

Министерство образования и науки
Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Ф И З И К А К О С М О С А

Труды 42-й Международной
студенческой научной конференции

Екатеринбург

28 января — 1 февраля 2013 г.

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2013

Редколлегия:

П. Е. Захарова (ответственный редактор), Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий, А. М. Соболев (Уральский федеральный университет), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Физика Космоса : Тр. 42-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв. — 1 февр. 2013 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. — 312 с.

ISBN 978-5-7996-0805-7

В сборнике представлены доклады и сообщения студенческой научной конференции, которая ежегодно проводится в Астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Цель конференции — обобщить достижения в области астрономии и астрофизики и способствовать формированию навыков и способностей молодых исследователей.

Сборник предназначен для профессиональных астрономов и физиков, студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 524.4

ISBN 978-5-7996-0805-7

© Уральский федеральный
университет, 2013

ФИЗИКА КОСМОСА
42-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Организаторы

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Международная общественная организация
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра астрономии и геодезии
Астрономическая обсерватория

28 января — 1 февраля 2013 г.

Екатеринбург, Россия

Научный организационный комитет:

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), П. Е. Захарова (Уральский федеральный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), В. Ф. Есипов (ГАИШ МГУ), И. И. Зинченко (ИПФ РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский федеральный университет), М. Г. Мингалиев (САО РАН), В. В. Орлов (НИАИ СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), А. М. Соболев (Уральский федеральный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Жюри конкурса студенческих научных работ

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), И. И. Зинченко (Институт прикладной физики РАН), В. В. Орлов (Санкт-Петербургский государственный университет), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), В. Ш. Шайдулин (Санкт-Петербургский государственный университет)

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района
г. Екатеринбурга

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Материалы конференции



Septem artes liberales.

Гравюра. XV в.

Обзорные лекции

А. В. Алакоз

Астрокосмический центр ФИАН

НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР «РАДИОАСТРОН»: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАЗЕРОВ

В докладе кратко освещаются структура наземно-космического интерферометра «РадиоАстрон», задачи и основные этапы работы, начиная с момента запуска космического радиотелескопа (КРТ) и по текущий момент. На примере исследования мазерных источников будут показаны все этапы наблюдательных исследований — от определения задач и выбора целей, до выбора конфигурации и первичной обработки полученных данных.

The lecture will describe the structure of the ground-space interferometer RadioAstron along with its tasks and major stages of development from the launch of the space radio telescope (SRT) until now. All stages of observational studies (from determination of tasks and source list to choice of configuration and primary data reduction) will be shown on example of research of the maser sources.

За прошедшее с момента запуска время была проведена программа тестирования КРТ и интерферометра в целом, подтвердившая успешную работоспособность во всех заявленных диапазонах — 92, 18, 6 и 1.35 см. Проведенные наблюдения позволили оценить параметры космического радиотелескопа, которые оказались близки к ожидавшимся. По мере завершения программы тестов эстафета постепенно перешла к так называемой ранней научной программе, призванной получить первые важные научные результаты, а также отладить рутинные методы наблюдений и обработки данных наземно-космического интерферометра для перехода к следующим этапам научной программы.

Ранняя научная программа разделена на несколько основных направлений, посвященных исследованиям пульсаров, активных галактических ядер и космических мазеров. Эти работы ведутся международными рабочими группами, координируемыми ведущей научной организацией проекта — Астрокосмическим центром ФИАН.

В рамках данной программы уже получены первые научные результаты — построена интерферометрическая карта активной галактики 0716+714 с компактными деталями, видимыми на проекции базы в 6.3 диаметра Земли. Это уже позволило достичь значительно более высокого разрешения, чем доступно на Земле. Исследования пульсара в Парусах позволили получить параметры неоднородности межзвездной плазмы на луче зрения и сделать первый шаг к определению размеров и положения области излучения в магнитосфере пульсара. Наблюдения мазерного излучения молекул воды и гидроксила от областей звездообразования позволили добиться рекордного для спектральных наблюдений углового разрешения.

В докладе основное внимание уделяется именно исследованию космических мазеров в миссии РадиоАстрон. Целью этих исследований является, с одной стороны, использование мазеров как инструментов исследования физики и динамики связанных с ними объектов. С другой стороны, эти наблюдения впервые могут обеспечить измерение экстремальных яркостных температур, что необходимо для изучения физики явления космических мазеров, возникающих в областях образования звезд и планет, оболочках проэволюционировавших звезд, аккреционных дисках и истечениях в окрестностях молодых звездных объектов и черных дыр в ядрах галактик. Будут показаны все этапы наблюдений — от определения задач и выбора целей до выбора конфигурации и первичной обработки полученных данных.

МАРСИАНСКИЕ МЕТЕОРИТЫ

Метеориты называют межпланетными зондами для бедных, поскольку они позволяют получить образцы внеземного вещества без дополнительных затрат. Однако довольно редко удается уверенно определить, образцом какого именно вещества является данный метеорит. Про некоторые метеориты говорят, что они прилетели на Землю с Марса. Насколько достоверно это утверждение?

Meteorites are called a poor man interplanetary probe, as they allow obtaining samples of extraterrestrial matter without additional overhead. However, quite seldom it is possible to identify definitely, which matter is sampled by a particular meteorite. Some meteorites are said to arrive on Earth from Mars. How well justified is this claim?

Введение

Метеорит, метеорит.
Откуда он родом — не говорит.
С. Щипачев

Полеты к различным телам Солнечной системы в последнее время не то чтобы превратились в рутину, но перестали быть чем-то сенсационным. Космические зонды одновременно работают у Луны, Марса, Венеры, Меркурия и Сатурна. Через несколько лет нас ожидают новые известия с Плутона (New Horizons) и из системы Юпитера (Juno).

Но при всем невероятном развитии космических путешествий нам до сих пор лишь с большим трудом удастся осуществлять полеты в оба конца — так, чтобы вернуть на Землю хоть крупицу инопланетного вещества. С другой стороны, время от времени фрагменты этого вещества сами летят к нам в руки в виде метеоритов. В этом случае к услугам исследователей весь потенциал земных лабораторий. Однако возникает другая проблема: анализируя строение и химический состав метеорита, понять, какая именно часть Солнечной системы анализируется.

Распознать регион происхождения метеорита бывает непросто. В очень редких случаях удастся определить траекторию полета метеорита непосредственно перед входом в земную атмосферу. Примерами могут служить метеороид 2008 TC₃, упавший в Судане, и метеорит Нойшванштайн [1]. Однако даже в этом случае мы узнаем лишь «последнюю» орбиту метеорита, а не его полный путь от источника до места назначения.

Поэтому при выяснении «истоков» метеорита приходится опираться на косвенные признаки — структуру, возраст, химический состав. Тем более что у различных метеоритов эти параметры, во-первых, различны; во-вторых, позволяют разделить метеориты на некоторое количество определенных групп, по всей видимости, указывающих на общность происхождения.

Один из наиболее общих способов классификации метеоритов состоит в их разделении на дифференцированные и недифференцированные. Недифференцированные метеориты, значительную долю которых составляют хондриты, пребывают в неизменном состоянии с момента образования Солнечной системы и считаются своеобразным окном в эпоху досолнечной эволюции. Дифференцированные метеориты являются образцами вещества, которое некогда входило в состав тел Солнечной системы, достаточно крупных, чтобы претерпеть дифференциацию, то есть разделение на железное ядро и каменистую мантию. Каменные дифференцированные метеориты называют еще ахондритами, поскольку в них, в отличие от хондритов, отсутствуют хондры — сфероидальные образования поперечником до сантиметра. По структуре ахондриты подобны земным базальтам и другим вулканическим породам.

SNC-метеориты

Размер имеет значение.

Народная мудрость

Для определения возрастов метеоритов применяются те же методы изотопной геохронологии, что и для определения возрастов земных горных пород. С 1970-х гг. известно, что среди ахондритов имеется особая группа, которая отличается от прочих метеоритов относительно малым возрастом, не превышающим 1.3 млрд лет, а возможно, и меньшим [2, 3]. В эту группу входят семейства метеоритов, называемые по первым представителям шерготтитами, наклитами и

шассиньитами, а также единственный метеорит ALH84001 [4]. Под возрастом в данном случае понимается возраст кристаллизации, то есть возраст, когда затвердел расплав, из которого состоит метеорит.

Изначально предполагалось, что SNC-метеориты родственны другим базальтовым метеоритам, в частности, эвкритам, спектральные свойства которых роднят их с Вестой [5]. Однако это предположение вступило в противоречие с незначительным возрастом SNC-метеоритов: трудно предположить, что на астероидах 1.3 млрд лет назад могла существовать магма. Оставалось допустить, что источником SNC-метеоритов являются не астероиды. На это указывали и другие их свойства, в частности, высокое содержание летучих, свойственное земным базальтам и не свойственное эвкритам. В целом сопоставление свойств SNC-метеоритов со свойствами земных, лунных и астероидных вулканических пород показывало, что они родились на *крупном* теле, по размеру занимающем промежуточное положение между Землей и Луной [6].

Возможных вариантов в Солнечной системе не так много. Фактически это Меркурий, Венера, Земля, Луна и Марс. Однако если принять во внимание дополнительные особенности, практически все они отпадают [7]. Для базальтов Земли и Луны возможно прямое сравнение химического и изотопного состава с составом SNC-метеоритов; оно показывает, что ни Земля, ни Луна их родительскими телами быть не могут. Кроме того, у SNC-метеоритов отсутствует остаточная намагниченность, поэтому Земля отпадает еще и как тело с сильным магнитным полем.

Оценки поверхностного состава Меркурия показывают, что в нем очень мало железа [8, 9], тогда как в SNC-метеоритах содержание FeO достигает 20 %. Точный химический состав поверхности Венеры неизвестен, однако можно ожидать, что в метеоритах останутся следы взаимодействия с атмосферой Венеры, чего в действительности не наблюдается. Кроме того, Венера и Земля наименее вероятны в качестве источника метеоритов по динамическим соображениям как планеты с наибольшей массой.

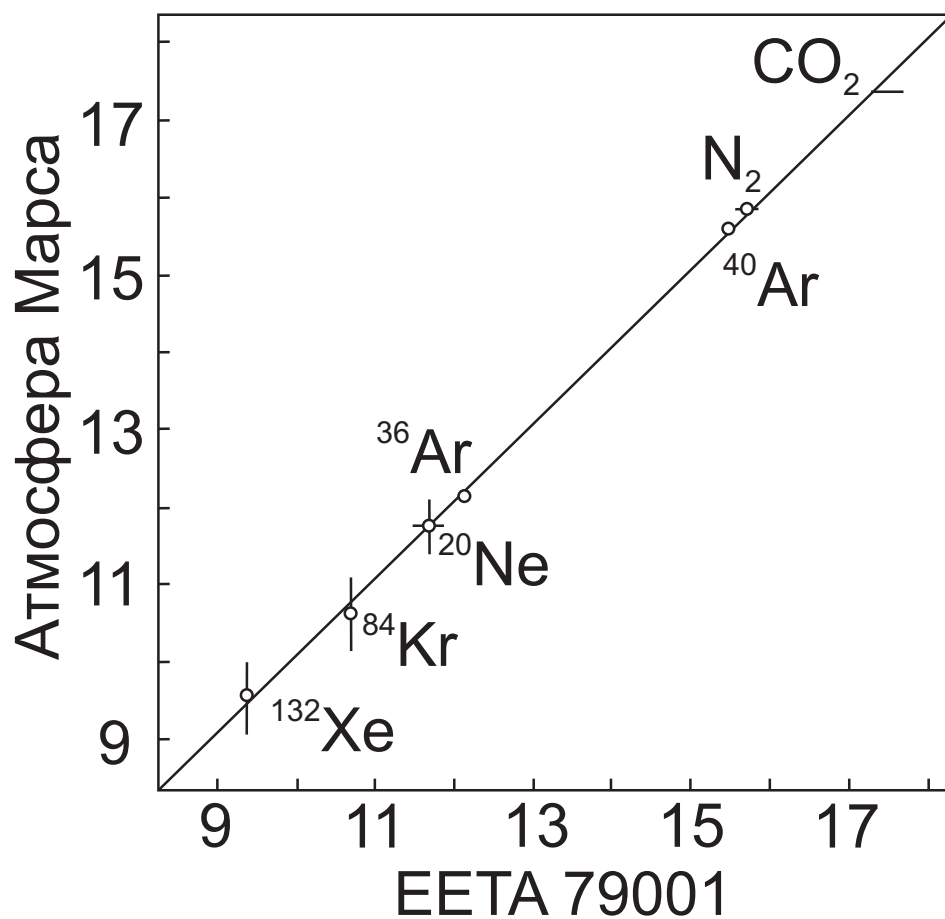
Это означает, что на место происхождения SNC-метеоритов остается только один кандидат — Марс. Он лишен магнитного поля; на его поверхности имеются изверженные породы относительно молодого возраста; химический состав поверхности Марса, определенный по данным «Викингов», прекрасно согласуется с составом шерготтитов и близок к составу наклитов и шассиньитов (см. таблицу).

Сравнение химического состава метеоритов Шерготти, Накла и Шассиньи с химическим составом марсианской почвы и земных горных пород [7, 10, 11]

Компонент	Шерготти, %	Накла, %	Шассиньи, %	Марс, %	Земля, %
SiO ₂	50.4	48.2	37.0	53.9	45
FeO	19.1	20.6	27.4	19.7	8.2
CaO	10.1	15.1	2.0	6.7	2.8
MgO	9.3	12.5	32.8	10.0	39.7
Al ₂ O ₃	6.7	1.5	0.4	6.8	3.2
TiO ₂	0.8	0.3	0.1	1.0	0.1
K ₂ O	0.2	0.1	0.03	0.1	0.02

Важным шагом в установлении марсианского происхождения SNC-метеоритов стало исследование газа, сохранившегося в стеклянных включениях шерготтита ЕЕТА79001, найденного в Антарктиде [12]. Первоначально авторы работы предполагали определить возраст метеорита, используя метод калий-аргонового датирования. Этот метод основан на предположении, что весь ⁴⁰Ar в образце является результатом распада радиоактивного изотопа калия ⁴⁰K. В ходе анализа выяснилось, что относительное количество аргона-40 в пузырьках ЕЕТА79001 в десятки и сотни раз превышает ожидаемое при любых разумных предположениях о возрасте метеорита. Это привело к предположению о том, что в пузырьках антарктического метеорита законсервирована атмосфера родительского тела шерготтитов. И содержание аргона и других благородных газов в этой атмосфере сильно напоминает состав марсианской атмосферы, также измеренный при помощи «Викингов» [13]. Вскоре сходство изотопного состава метеорита ЕЕТА79001 и марсианской атмосферы было выявлено также для азота и углерода [14, 15]. Сравнение химического состава ЕЕТА79001 и атмосферы Марса представлено на рисунке.

В целом можно сказать, что сходство химического и изотопного состава SNC-метеоритов с составом Марса и марсианской атмосферы вполне уверенно (хотя и не без проблем; см., например, [17]) указывает, что их источником является Красная планета. К сожалению, до сих пор без ясного ответа остается главный вопрос: как именно «марсианские» метеориты покидают Марс и попадают на Землю?



Сравнение химического состава EETA79001 и атмосферы Марса для различных атомов и изотопов [16]

Доставка вещества с Марса

Метеорит — птица гордая.
Народная мудрость

Проблема доставки вещества с Марса связана главным образом с самым первым этапом. В целом очевидно, что выброс вещества с поверхности Марса должен происходить в результате столкновения планеты с достаточно крупным астероидом. Однако это общее предположение необходимо согласовать с целым рядом особенностей SNC-метеоритов. Прежде всего, выброс должен был произойти в «щадающем» режиме. Шерготтиты подвергались довольно умеренному ударному воздействию, а наклиты и шассиньиты испытали его в еще меньшей степени. Оказалось достаточно сложно придумать модель, которая объясняла бы выброс вещества со скоростью, выше скорости убегания, практически в нетронутом виде.

Ситуация усугублялась еще и неясностями с определением возраста шерготтитов. У тех нескольких метеоритов, что были известны в конце 1970-х гг., возраст кристаллизации был примерно один и тот же — около 160—180 млн лет, а времена пребывания в межпланетном пространстве, оцененные по эрозии космическими лучами (cosmic ray exposure, CRE), довольно сильно различались. На этой основе возникла двухэтапная модель доставки шерготтитов на Землю [3]: сначала с Марса в результате единого события около 160 млн лет назад был выброшен крупный фрагмент 10—15 м в поперечнике, который затем дробился при столкновениях с другими астероидами. Фрагменты, возникшие в результате этого дробления, постепенно выпадают на Землю.

Чтобы объяснить отсутствие существенного ударного воздействия в этих фрагментах, предлагались различные версии: выброс в результате взрывного испарения подповерхностного ледяного слоя [18], касательный удар [19], «скалывание» поверхностного слоя в результате взаимодействия ударных волн [20]. Однако в любом случае выброс многометрового фрагмента возможен лишь при катастрофическом событии, которое должно было оставить после себя кратер поперечником в сотни километров [21].

Малая вероятность такого недавнего события привела к тому, что со временем большее предпочтение стало отдаваться модели, в которой марсианские метеориты выбрасывались с поверхности планеты в «готовом» виде, без последующего дробления. В этом случае исход-

ное падение астероида на Марс уже не должно быть катастрофическим; достаточно объекта, порождающего кратер поперечником всего в несколько километров [22].

Однако в этом случае возникает противоречие иного сорта. Разброс возрастов SNC-метеоритов говорит о том, что наклиты и шассиньиты могли быть порождены одним событием, произошедшим около 11 млн лет назад. А вот шерготтиты должны были появиться в результате как минимум 4—6 различных событий [23]. Кстати, их разнородность подчеркивается и различиями в строении: строго говоря, в данном случае в одну группу по историческим причинам объединены тела, которые при других обстоятельствах могли стать двумя отдельными группами — базальтовые шерготтиты и лерцолиновые шерготтиты. Поскольку поверхность Марса в основном очень старая, при случайном выбивании вещества с нее мы могли бы ожидать, что шерготтиты также будут в среднем иметь значительные возрасты.

Для разрешения «парадокса возраста» шерготтитов предложено два объяснения. Первое состоит в том, что шерготтиты на самом деле гораздо старше, чем считалось до сих пор [24, 25]. Второе заключается в предположении, что падения метеоритов действительно выбивают с Марса в основном старые породы, но у молодых пород гораздо больше шансов долететь до Земли [26].

Заключение

По состоянию на осень 2012 г. на Земле было найдено 65 марсианских метеоритов¹. Подавляющее их большинство относится к шерготтитам, которые, как мы теперь знаем, сами обладают весьма разнообразными свойствами. В совокупности все эти метеориты оказываются интереснейшим окном в настоящее и прошлое не только марсианской коры, но и марсианской атмосферы. Они могут скрывать в себе информацию как о давней эпохе дифференциации вещества Марса, так и о его относительно недавнем вулканическом прошлом. В последние годы важным дополнением к марсианским метеоритам стали геологические исследования, проводимые при помощи марсоходов.

Работа выполнена при поддержке гранта НШ-3602.2012.2, а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

¹ <http://www.imca.cc/mars/martian-meteorites-list.htm>

Библиографические ссылки

1. *Spurný P., Oberst J., Heinlein D.* Photographic observations of Neuschwanstein, a second meteorite from the orbit of the Příbram chondrite // *Nature*. — 2003. — Vol. 423. — P. 151–153.
2. *Podosek F. A.* Thermal history of the nakhlites by the ^{40}Ar - ^{39}Ar method // *Earth and Planetary Science Letters*. — 1973. — Vol. 19. — P. 135.
3. *Nyquist L. E., Wooden J., Bansal B. et al.* Rb-Sr age of the Shergotty achondrite and implications for metamorphic resetting of isochron ages // *Geochim. Cosmochim. Acta*. — 1979. — Vol. 43. — P. 1057–1074.
4. *Mittlefehldt D. W.* ALH84001, a cumulate orthopyroxenite member of the Martian meteorite clan // *Meteoritics*. — 1994. — Vol. 29. — P. 214–221.
5. *De Sanctis M. C., Ammannito E., Capria M. T. et al.* Spectroscopic Characterization of Mineralogy and Its Diversity Across Vesta // *Science*. — 2012. — Vol. 336. — P. 697–.
6. *Walker D., Stolper E. M., Hays J. F.* Basaltic volcanism — The importance of planet size // *Lunar and Planetary Science Conf. Proc.* / ed. by N. W. Hinners : *Lunar and Planetary Science Conf. Proc.* — 1979. — Vol. 10. — P. 1995–2015.
7. *Wood C. A., Ashwal L. D.* SNC meteorites — Igneous rocks from Mars // *Lunar and Planetary Science Conf. Proc.* / ed. by R. B. Merrill, R. Ridings : *Lunar and Planetary Science Conf. Proc.* — 1982. — Vol. 12. — P. 1359–1375.
8. *Mitchell D. L., de Pater I.* Microwave imaging of Mercury's thermal emission at wavelengths from 0.3 to 20.5 cm // *Icarus*. — 1994. — Vol. 110. — P. 2–32.
9. *Nittler L. R., Starr R. D., Weider S. Z. et al.* The Major-Element Composition of Mercury's Surface from MESSENGER X-ray Spectrometry // *Science*. — 2011. — Vol. 333. — P. 1847–.
10. *Baird A. K., Clark B. C.* On the original igneous source of Martian fines // *Icarus*. — 1981. — Vol. 45. — P. 113–123.
11. *Smith M. R., Laul J. C., Ma M.-S. et al.* Petrogenesis of the SNC (shergottites, nakhlites, chassignites) meteorites — Implications for their origin from a large dynamic planet, possibly Mars // *Lunar and*

- Planetary Science Conf. Proc. / ed. by W. V. Boynton, G. Schubert : Lunar and Planetary Science Conf. Proc. — 1984. — Vol. 14. — P. 612.
12. *Bogard D. D., Johnson P.* Martian gases in an Antarctic meteorite? // *Science*. — 1983. — Vol. 221. — P. 651—654.
 13. *Owen T., Biemann K., Biller J. E. et al.* The composition of the atmosphere at the surface of Mars // *J. Geophys. Res.* — 1977. — Vol. 82. — P. 4635—4639.
 14. *Becker R. H., Pepin R. O.* The case for a Martian origin of the shergottites — Nitrogen and noble gases in EETA 79001 // *Earth and Planetary Science Letters*. — 1984. — Vol. 69. — P. 225—242.
 15. *Carr R. H., Grady M. M., Wright I. P., Pillinger C. T.* Martian atmospheric carbon dioxide and weathering products in SNC meteorites // *Nature*. — 1985. — Vol. 314. — P. 248—250.
 16. *Pepin R. O.* Meteorites: Evidence of Martian origins // *Nature*. — 1985. — Vol. 317. — P. 473—475.
 17. *Ott U., Begemann F.* Are all the 'Martian' meteorites from Mars? // *Nature*. — 1985. — Vol. 317. — P. 509—512.
 18. *Wasson J. T., Wetherill G. W.* Dynamical chemical and isotopic evidence regarding the formation locations of asteroids and meteorites // *Asteroids* / ed. by T. Gehrels. — 1979. — P. 926—974.
 19. *Nyquist L. E.* Do oblique impacts produce Martian meteorites // *Lunar and Planetary Science Conf. Proc.* / ed. by W. V. Boynton, T. J. Ahrens : *Lunar and Planetary Science Conf. Proc.* — 1983. — Vol. 13. — P. 785.
 20. *Melosh H. J.* Impact ejection, spallation, and the origin of meteorites // *Icarus*. — 1984. — Vol. 59. — P. 234—260.
 21. *Vickery A. M., Melosh H. J.* The large crater origin of SNC meteorites // *Science*. — 1987. — Vol. 237. — P. 738—743.
 22. *Head J. N., Melosh H. J., Ivanov B. A.* Martian Meteorite Launch: High-Speed Ejecta from Small Craters // *Science*. — 2002. — Vol. 298. — P. 1752—1756.
 23. *Nyquist L. E., Bogard D. D., Shih C.-Y. et al.* Ages and Geologic Histories of Martian Meteorites // *Sol. Syst. Research*. — 2001. — Vol. 96. — P. 105—164.

24. *Bouvier A., Blichert-Toft J., Vervoort J. D., Albarède F.* The age of SNC meteorites and the antiquity of the Martian surface [rapid communication] // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2005. — Vol. 240. — P. 221—233.
25. *Bouvier A., Blichert-Toft J., Vervoort J. D. et al.* The case for old basaltic shergottites // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2008. — Vol. 266. — P. 105—124.
26. *Walton E. L., Kelley S. P., Herd C. D. K.* Isotopic and petrographic evidence for young Martian basalts // *Geochim. Cosmochim. Acta*. — 2008. — Vol. 72. — P. 5819—5837.

К ВОПРОСУ О ХАОТИЧНОСТИ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

В работе описываются различные подходы к исследованию хаотичности и оценке времени предсказуемости движения астероидов, сравниваются их эффективность и получаемые с их помощью результаты. Приводятся оценки времени предсказуемости для некоторых особых астероидов, сближающихся с Землей.

The paper describes the different approaches to the investigation of chaos and estimation of motion predictability time of asteroids and compares its efficiency and results. There are the estimations of motion predictability time of some particular near-Earth asteroids in the paper.

Введение

С начала 80-х гг. прошлого века большое внимание уделяется проблемам исследования хаотичности и оценкам времени предсказуемости движения астероидов. Несмотря на то что в этой области достигнуты значительные успехи (например, [1–6]), до сих пор остается много нерешенных вопросов. Основные проблемы связаны с исследованием движения астероидов, сближающихся с Землей, что обусловлено рядом причин. В частности, тем, что движение таких объектов невозможно изучать аналитическими методами, а исследование численными методами сопряжено с рядом трудностей, таких как быстрый рост ошибок округления при тесных сближениях. Кроме того, при тесных сближениях происходит значительное увеличение доверительной области, что приводит к необходимости исследовать эволюцию большого числа тестовых частиц. Указанные и некоторые другие трудности делают проблематичным не только исследование движения, но и оценку времени предсказуемости.

Характеристики хаотичности

Как известно, начальные параметры движения определяются из наблюдений не точно, а с некоторой погрешностью. Поэтому при

исследовании долговременной орбитальной эволюции нельзя ограничиться изучением только номинальной орбиты, необходимо исследовать эволюцию некоторого множества тестовых частиц из начальной доверительной области. При этом со временем траектории тестовых частиц будут расходиться. Средняя скорость расхождения может быть определена как [7]

$$\gamma(t) = \frac{\ln \left(\frac{\|d\|}{\|d_0\|} \right)}{t - t_0}, \quad (1)$$

где d — малое n -мерное смещение траектории, удовлетворяющее линейному дифференциальному уравнению; $\| \cdot \|$ — евклидова норма; t — время; индекс «0» относится к начальным значениям.

Если траектории квазипериодические, то d будет расти в среднем линейно и $\gamma(t)$ будет со временем стремиться к нулю. Если траектории хаотические, то d растет в среднем экспоненциально и $\gamma(t)$ будет стремиться со временем к некоторой положительной константе.

Предел $\gamma(t)$ при $t \rightarrow \infty$ представляет собой наибольший из n характеристических показателей Ляпунова (LCE), где n — размерность системы. Таким образом, скорость экспоненциального разбегания близких орбит определяется величиной $\lambda = \max LCE$. Если известно λ , то можно найти так называемое ляпуновское время T_L :

$$T_L = \frac{1}{\lambda}. \quad (2)$$

Среднее время предсказуемости хаотической системы T_{pr} определяется следующим образом:

$$T_{pr} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\|d\|}{\|d_0\|} \right) = T_L \cdot \ln \left(\frac{\|d\|}{\|d_0\|} \right). \quad (3)$$

Следует отметить, что T_{pr} соответствует момент времени, с которого величина $\gamma(t)$ перестает убывать и становится близкой к постоянной величине. На временах, больших T_{pr} , первоначально близкие траектории расходятся в среднем экспоненциально в ограниченной области фазового пространства, что приводит к быстрому росту доверительной области и фактически к непредсказуемости движения. Особенно важно уметь определять время предсказуемости движения для потенциально опасных астероидов.

Ляпуновское характеристическое число и ляпуновское время традиционно используются при исследовании хаотичности движения [1–4]. Однако эти характеристики обладают некоторыми недостатками, которые заметно проявляются при исследовании движения АСЗ. Во-первых, для определения ляпуновского времени необходимо изучить орбитальную эволюцию на интервале времени, в несколько раз его превышающем. Во-вторых, в некоторых случаях затруднена однозначная интерпретация результатов.

Одним из путей решения указанных проблем является использование в качестве характеристики хаотичности сравнительно недавно введенного параметра MEGNO (Mean Exponential Growth of Nearby Orbit) [8], то есть среднего экспоненциального расхождения близких орбит. Параметр MEGNO представляет собой взвешенную по времени интегральную форму ляпуновского характеристического числа и в значительной степени свободен от перечисленных выше недостатков при оценке времени предсказуемости движения рассматриваемых объектов. Рассмотрим этот параметр более подробно.

Параметр MEGNO определяется следующим образом:

$$Y(t) = \frac{2}{t} \int_0^t \frac{\dot{\delta}(s)}{\delta(s)} s ds, \quad (4)$$

где $\delta(s)$ — так называемый касательный вектор, который измеряет эволюцию начального бесконечно малого отклонения между решением и очень близкой орбитой. Средняя величина $\bar{Y}(t)$ получается как

$$\bar{Y}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t Y(t) ds. \quad (5)$$

Эволюция усредненного параметра MEGNO $\bar{Y}(t)$ во времени позволяет выявить различный характер орбит. При квазипериодическом (регулярном) движении с линейным расхождением близких орбит $\bar{Y}(t)$ осциллирует около 2. При экспоненциальном расхождении близких орбит $\bar{Y}(t)$ растет линейно, переходит значение 2 и движение становится непредсказуемым. Далее в данной работе для краткости под параметром MEGNO будем понимать усредненный параметр MEGNO $\bar{Y}(t)$ (5).

Сравнительный анализ различных методов оценивания времени предсказуемости движения АСЗ

Нами было проведено сравнение описанных выше методов оценивания времени предсказуемости движения [9]. В качестве примера приведем результаты для астероидов 4179 Toutatis и 153814 2001 WN5. Астероид 4179 Toutatis движется в окрестности резонанса 3/1 с Юпитером. На рис. 1 для данного объекта показаны сближения с большими планетами и эволюция резонансной щели на интервале времени до 3000 г. Астероид 153814 2001 WN5 примечателен тем, что 26 июня 2028 г. пройдет через сферу тяготения Земли. На рис. 2 представлены сближения этого астероида с Землей и Марсом на интервале 900 лет.

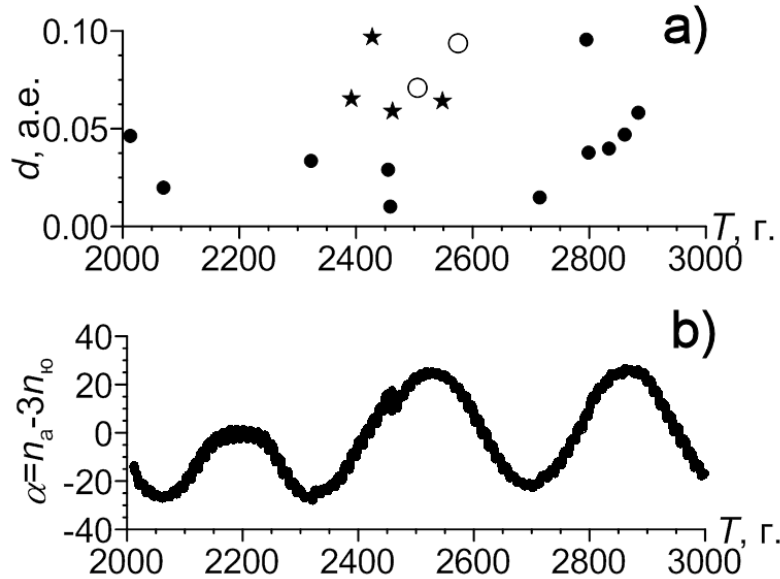


Рис. 1. Сближения с Венерой (o), Землей (●) и Марсом (★) (a) и эволюция резонансной щели α (в $^{\circ}/\text{сут}$) (b) для астероида 4179 Toutatis: d — расстояние до планеты, а. е.; T — время, годы

На рисунках 3—4 приведены оценки характеристик хаотичности движения для рассматриваемых объектов; представлена эволюция средней скорости расхождения двух первоначально близких орбит АСЗ $\gamma(t)$ (a) и усредненного MEGNO-параметра $\bar{Y}(t)$ (b). Для сравнения на рис. 3, а и 4, а пунктирной линией показана эволюция величины γ для астероида 10 Нугиеа, который относится к Главному

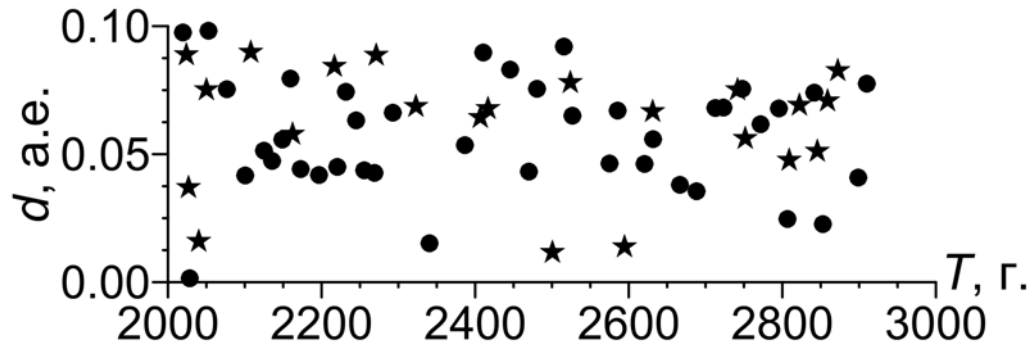


Рис. 2. Сближения с Землей (●) и Марсом (★) для астероида 153814 2001 WN5: d — расстояние до планеты, а. е.; T — время, годы

поясу и движение которого на рассматриваемых интервалах является регулярным. На рис. 3, а и 4, а пунктиром отмечена граница регулярного движения ($\bar{Y}(t) = 2$).

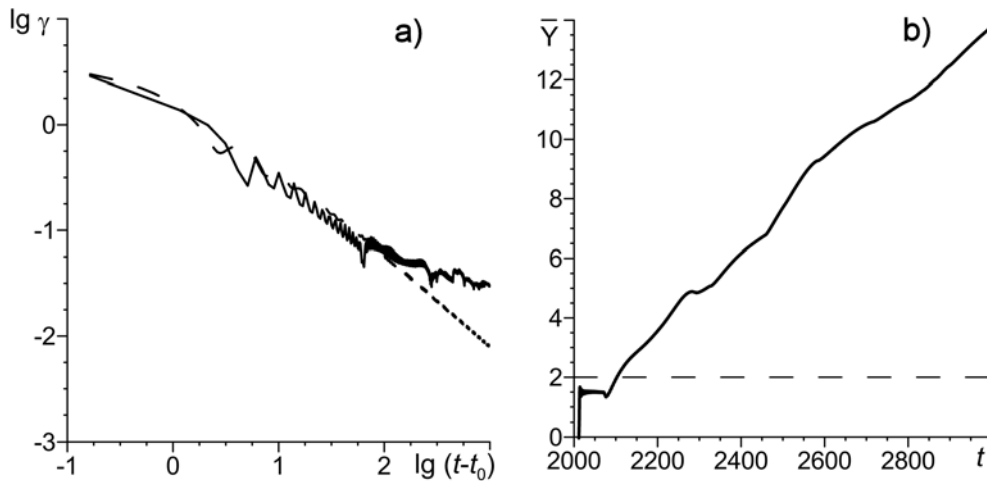


Рис. 3. АСЗ 4179 Toutatis. Эволюция средней скорости расхождения двух первоначально близких орбит (а) и усредненного параметра MEGNO (b) в течение 1000 лет: t — время, годы

На рисунке 3, b видно, что под влиянием сближения с Землей в 2069 г. параметр MEGNO для астероида 4179 Toutatis начинает расти линейным образом и в 2102 г. достигает критического значения $\bar{Y}(t) = 2$. Примерно в то же время замедляется скорость падения величины $\gamma(t)$ (рис. 3, а), и она стремится к константе. Однако определить точно момент перехода к хаотическому движению по параметру $\gamma(t)$ не представляется возможным.

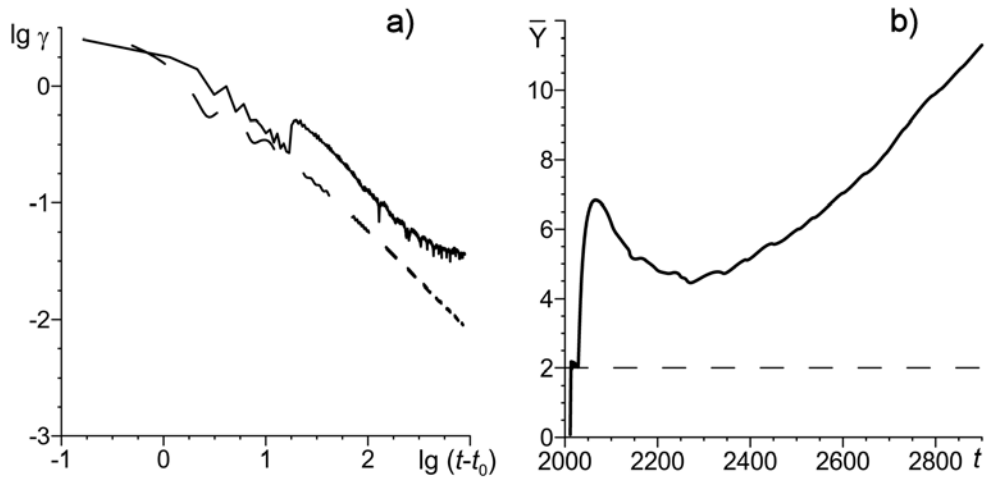


Рис. 4. АСЗ 153814 2001 WN5. Эволюция средней скорости расхождения двух первоначально близких орбит (а) и усредненного параметра MEGNO (b) в течение 900 лет: t — время, годы

Аналогичная ситуация наблюдается у астероида 153814 2001 WN5. Прохождение через сферу тяготения Земли в 2028 г. приводит к резкому росту параметра MEGNO (рис. 4, b). Через некоторое время рост сменяется незначительным падением, и начиная с 2270 г. до конца интервала исследования параметр MEGNO линейно растет. Этим моментам соответствуют рост и стабилизация величины $\gamma(t)$ (рис. 4, a) соответственно.

Таким образом, время предсказуемости для астероида 4179 Toutatis составляет порядка 100 лет, а движение 153814 2001 WN5 становится непредсказуемым после 2028 г. Различные методы исследования дают близкие результаты, однако на практике использование параметра MEGNO существенно облегчает интерпретацию результатов.

Оценки времени предсказуемости движения для всей совокупности АСЗ

Нами была исследована эволюция параметра MEGNO для всей совокупности АСЗ и определено для них время предсказуемости. Начальные данные взяты из каталога Э. Боуэлла [10] на 14 мар-

Таблица 1. Статистические оценки времени предсказуемости всей совокупности АСЗ.

Интервал предсказуемости	Число астероидов
$T_{pr} < 10$ лет	56 (0.6 %)
$10 < T_{pr} \leq 50$ лет	579 (6.6 %)
$50 < T_{pr} \leq 100$ лет	863 (9.8 %)
$100 < T_{pr} \leq 150$ лет	710 (8.1 %)
$150 < T_{pr} \leq 200$ лет	632 (7.2 %)
$200 < T_{pr} \leq 300$ лет	806 (9.2 %)
$300 < T_{pr} \leq 400$ лет	681 (7.8 %)
$400 < T_{pr} \leq 500$ лет	513 (5.9 %)
$500 < T_{pr} \leq 700$ лет	714 (8.2 %)
$700 < T_{pr} \leq 990$ лет	659 (7.6 %)
$T_{pr} > 990$ лет	2 504 (29 %)

та 2012 г., в котором содержатся оскулирующие элементы орбит 8717 АСЗ. Интервал интегрирования определялся фондом координат больших планет DE406 и сохранением приемлемой точности.

Результаты данного исследования представлены в табл. 1. Половина всех АСЗ имеют время предсказуемости меньше 400 лет, 56 астероидов — даже меньше 10 лет. Движение только 29 % от общего числа АСЗ оказалось предсказуемо на всем рассматриваемом интервале времени.

Для сравнения приведем результаты других авторов. Оценки ляпуновского времени для АСЗ выполнялись несколькими авторами [1–3]. В результате исследования движения 307 АСЗ Танкреди сделал вывод, что ляпуновские времена для этих объектов находятся в интервале от 10 до 300 лет, причем в основном они составляют 50–150 лет [2]. Нижняя граница оценок Танкреди хорошо совпадает с оценками Уиппла, полученными для 175 астероидов, относящихся к внутренней части Солнечной системы ($q < 1.6$ а. е.) [1]. По его оценкам, ляпуновские времена лежат в интервале (10, 20 000) лет. В работе И. Влодарчика [3] выполнены оценки времени предсказуемости движения для 10 000 астероидов групп Атона, Аполлона и Амура. Результаты расчетов показали, что эти времена очень короткие: для 33 % астероидов $< 1\,000$ лет и для 89 % $< 10\,000$ лет.

Таким образом, все приведенные оценки для АСЗ говорят о том, что ляпуновские времена для этих объектов действительно очень короткие. Нижняя граница этих времен составляет 10 лет, что хорошо согласуется с полученными нами результатами. Следует заметить, что в главном поясе астероидов не встречаются объекты, ляпуновские времена которых были бы меньше 400 лет [11]. Одной из причин небольших времен предсказуемости для АСЗ являются сближения с большими планетами. Предположение о наличии зависимости между частотой тесных сближений и ляпуновским временем этих объектов было сделано в работе [12] на основании исследования орбитальной эволюции 4 190 объектов, пересекающих орбиту Марса. В следующем разделе приводятся наши оценки времени предсказуемости движения астероидов, проходящих через сферу Хилла Земли [6] (значение радиуса сферы Хилла Земли составляет примерно 0.01 а. е.).

Оценка времени предсказуемости движения астероидов, проходящих через сферу Хилла Земли

Как упоминалось выше, многочисленные тесные сближения часто приводят к непредсказуемости движения. Поэтому представляет особый интерес оценка времени предсказуемости движения для астероидов, имеющих очень тесные сближения с планетами, в частности проходящими через сферу Хилла Земли. Данное исследование проводилось в два этапа: на первом этапе были выявлены все астероиды, которые пройдут через сферу Хилла Земли в ближайшем будущем; на втором — для каждого объекта построена эволюция параметра MEGNO и оценено время предсказуемости движения.

Выявление астероидов, проходящих через сферу Хилла Земли

Начальные элементы орбит астероидов были взяты из каталога Э. Боуэлла на эпоху 5 декабря 2011 г. Уравнения движения 8431 АСЗ интегрировались численно методом Эверхарта на интервале времени (2011, 2200 гг.), который определялся фондом координат больших планет DE405. Движение астероидов рассматривалось в рамках возмущенной задачи двух тел в прямоугольной гелиоцентрической си-

Таблица 2. Сближения с Землей некоторых АСЗ, проходящих через сферу Хилла в ближайшее время

Объект	Дата	d_{min}	Объект	Дата	d_{min}
2000 YA	26.12.2011	0.00737	2006 HX57	07.05.2023	0.00068
2003 XV	07.12.2011	0.00272	2007 EN88	13.03.2023	0.00785
2010 KK37	19.05.2012	0.00318	2009 QR	25.08.2023	0.00474
2001 AV43	16.11.2013	0.00593	2009 VT1	15.10.2023	0.00522
2005 CM7	02.02.2014	0.00776	2004 NU7	29.06.2024	0.00274
2009 RR	16.09.2014	0.00325	2006 WB	26.11.2024	0.00274
2011 FQ21	23.03.2014	0.00641	2007 XB23	11.12.2024	0.00224
2004 BL86	26.01.2015	0.00802	1997 UA11	26.10.2026	0.00975
2006 LH	23.12.2016	0.00827	2008 YO2	04.06.2026	0.00572
2008 WM61	29.11.2017	0.00866	2010 VQ	12.12.2026	0.00243
2008 GY21	10.04.2018	0.00166	137108 1999 AN10	07.08.2027	0.00408
2011 HJ7	12.05.2018	0.00594	35396 1997 XF11	26.10.2028	0.00891
2005 NG56	16.07.2019	0.00741	153814 2001 WN5	26.06.2028	0.00928
2006 QV89	09.09.2019	0.00047	2009 SM98	09.09.2028	0.00261
2001 GP2	03.10.2020	0.00799	2009 WR52	20.05.2028	0.00621
2007 FR3	26.03.2020	0.00547	2002 AN129	03.05.2029	0.00166
2011 CL50	24.12.2020	0.00706	2006 HE2	30.09.2029	0.00289
2004 UT1	29.10.2022	0.00706	292220 2006 SU49	28.01.2029	0.00685
2009 BF58	21.01.2022	0.00068	99942 Apophis	13.04.2029	0.00389
1979 XB	17.10.2023	0.00801	2007 VX83	09.11.2030	0.00498

стеме координат, отнесенной к эклиптике и равноденствию 2000.0. В модель сил были включены влияния всех больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады и Весты.

Проведенные исследования показали, что через сферу Хилла Земли на рассматриваемом интервале времени проходят 432 астероида. Среди выявленных АСЗ большая часть астероидов проходят через сферу Хилла единожды (320 АСЗ), некоторые объекты проходят через нее дважды (90 АСЗ). Кроме того, был обнаружен 21 астероид, который проходит через сферу Хилла Земли три раза. И всего один объект на рассматриваемом интервале прошел четыре раза на расстоянии от центра Земли, меньшем 0.01 а. е. (2007 UT3). В табл. 2 в качестве примера приведены данные о прохождении астероидов через сферу Хилла Земли до 2030 г. Здесь для каждого объекта представлены календарная дата прохождения через сферу Хилла, а также расстояние до центра Земли d_{min} в астрономических единицах. Следует отметить, что приведенные результаты получены для номинальных орбит.

Вычисление параметра MEGNO для астероидов, проходящих через сферу Хилла Земли

Для каждого из 432 АСЗ нами была исследована эволюция параметра MEGNO на интервале времени (2011, 2200 гг.). Полученные результаты позволили сделать вывод, что для всех АСЗ прохождение через сферу Хилла Земли приводит к росту усредненного параметра MEGNO $\bar{Y}(t)$, причем скорость роста $\bar{Y}(t)$ зависит от расстояния до Земли.

Проведенные исследования показали, что для большинства астероидов (254 АСЗ) движение становится непредсказуемым после прохождения через сферу Хилла; для 163 АСЗ в момент прохождения через сферу Хилла Земли движение уже непредсказуемо из-за многочисленных сближений с большими планетами, в том числе с Землей, произошедших до момента прохождения через данную сферу. Исключением являются 15 АСЗ, движение которых регулярно на рассматриваемом интервале времени, и параметр MEGNO колеблется ниже уровня двойки. Эти объекты проходят через сферу Хилла Земли в конце интервала интегрирования; и параметр MEGNO начинает постепенно расти, но не успевает достичь порогового значения ($\bar{Y}(t) = 2$).

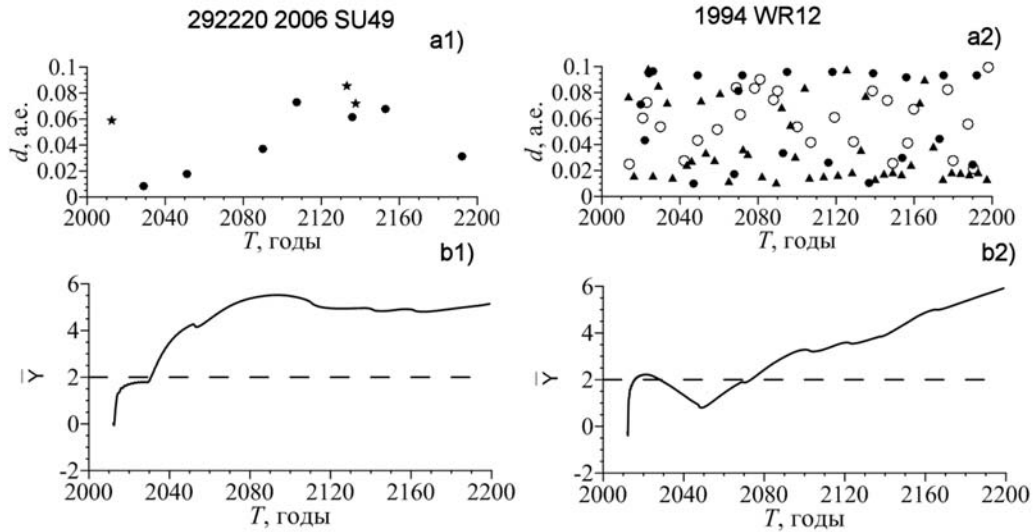


Рис. 5. Сближения с Меркурием (Δ), Венерой (\circ), Землей (\bullet) и Марсом (\star) (a1, a2); эволюция параметра MEGNO (b1, b2) для астероидов 292220 2006 SU49 и 1994 WR12: d — расстояние до центра планеты

На рисунках 5—7 представлены графики сближений астероидов с большими планетами и эволюция усредненного параметра MEGNO для объектов описанных выше групп. Из рисунков видно, что под влиянием тесных сближений с Землей усредненный параметр MEGNO изменяет свое поведение и начинает со временем расти, причем скорость его роста зависит от того, насколько тесным было сближение.

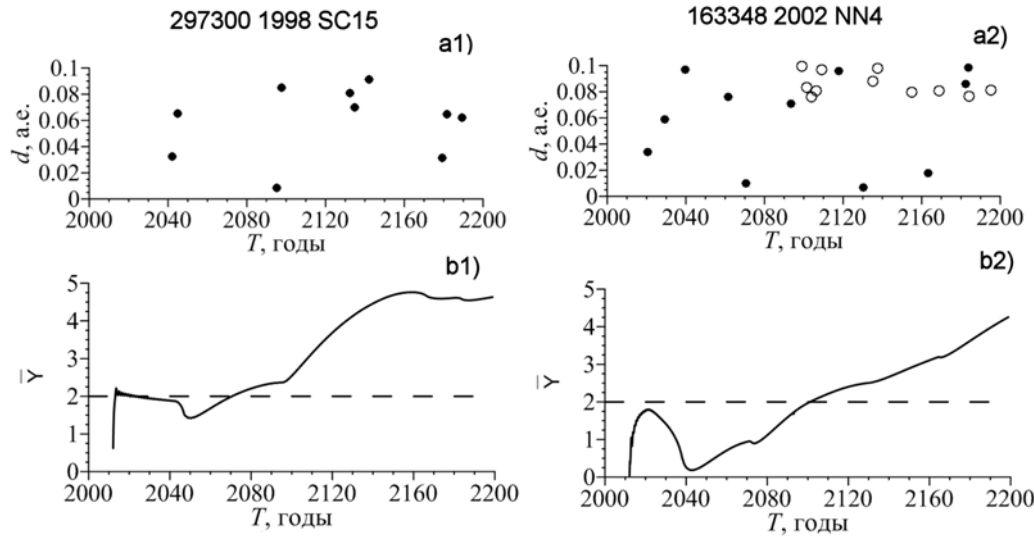


Рис. 6. Сближения с Венерой (o), Землей (●) и Марсом (*) (a1, a2); эволюция параметра MEGNO (б1, б2) для астероидов 297300 1998 SC15 и 163348 2002 NN4: d — расстояние до центра планеты

Из рисунка 5 видно, что астероиды 292220 2006 SU49 и 1994 WR12 принадлежат первой группе AC3, для которых движение становится непредсказуемым после прохождения через сферу Хилла Земли. Астероиды 297300 1998 SC15 и 163348 2002 NN4 (рис. 6) принадлежат ко второму классу деления по MEGNO (163 AC3), так как к моменту прохождения через сферу Хилла параметр MEGNO $\bar{Y}(t)$ уже перешел пороговое значение из-за предшествующих сближений с Землей. На рисунке 7 приведены сближения с планетами земной группы и графики эволюции параметра $\bar{Y}(t)$ для астероидов 196625 2003 RM10 и 2001 UD5, движение которых можно считать устойчивым на рассматриваемом интервале времени, но после прохождения через сферу Хилла Земли $\bar{Y}(t)$ начинает расти. Сделать выводы о движении этих астероидов можно только при исследовании их движения на большем интервале времени.

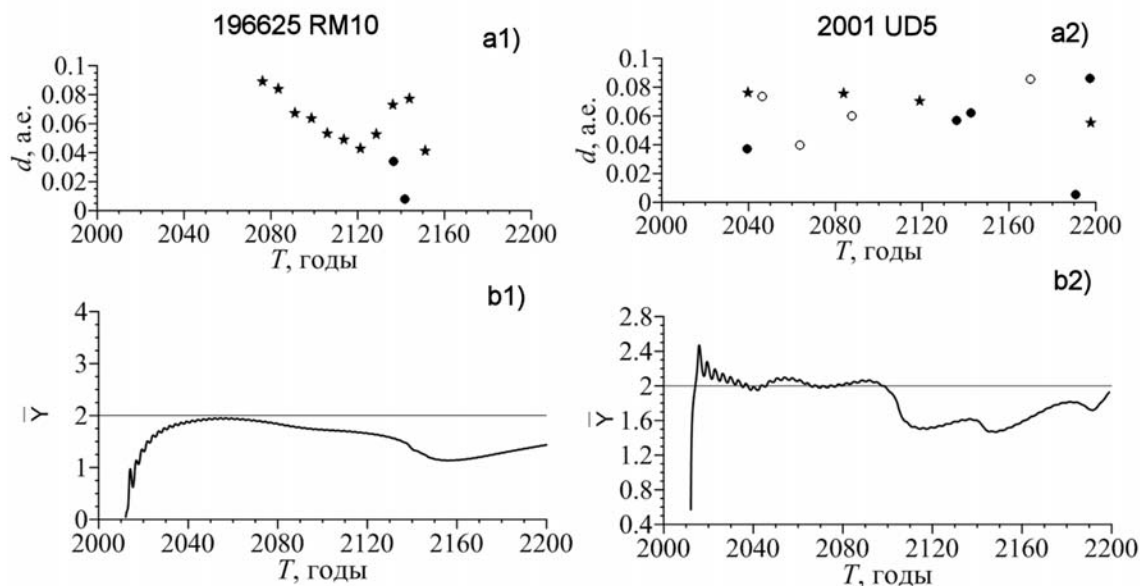


Рис. 7. Сближения с Венерой (o), Землей (•) и Марсом (*) (a1, a2); эволюция параметра MEGNO (b1, b2) для астероидов 196625 2003 RM10 и 2001 UD5: d — расстояние до центра планеты

Заключение

Таким образом, в данной работе представлены различные подходы к исследованию хаотичности движения АСЗ и определению времени предсказуемости. Рассмотрены такие характеристики хаотичности, как ляпуновский характеристический показатель, ляпуновское время и параметр MEGNO. В статье приводятся результаты сравнения результатов оценки времени предсказуемости некоторых АСЗ, полученных разными методами. Показано, что различные методы дают близкие результаты, однако на практике удобнее пользоваться параметром MEGNO.

Кроме того, в статье представлены оценки времени предсказуемости для всей совокупности АСЗ. Показано, что половина всех АСЗ имеют время предсказуемости меньше 400 лет, более того, было выявлено 56 астероидов, время предсказуемости которых меньше 10 лет. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами других авторов. Особое внимание в работе уделено движению астероидов, проходящих через сферу Хилла Земли. Результаты исследования показали, что прохождение через сферу Хилла приводит к росту параметра MEGNO, и через некоторое время движение становится хаотичным и непредсказуемым.

Авторы выражают благодарность В. А. Авдюшеву, Т. В. Бордо-вицыной и Л. Е. Быковой за ценные консультации.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-02-00918-а и 12-02-31255 мол_а.

Библиографические ссылки

1. *Whipple A.* Lyapunov times of the inner asteroids // *Icarus*. — 1995. — Vol. 115. — P. 347—353.
2. *Tancredi G.* Chaotic dynamics of planet-encountering bodies // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* — 1998. — Vol. 70. — P. 181—200.
3. *Wlodarczyk I.* The prediction of the motion of the Atens, Apollos and Amors over long intervals of time // *Dynamics of natural and artificial celestial bodies. Proc. US/European Celest. Mech. Workshop, Poznan-Poland, 3—7 July 2000. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.* — 2001. — P. 341—342.
4. *Шевченко И. И., Куприянов В. В., Мельников А. В.* Хаотическая динамика астероидов и максимальные показатели Ляпунова // *Астрон. вестн.* — 2003. — Т. 37, вып. 1. — С. 80—89.
5. *Галушина Т. Ю., Раздымакина О. Н.* О предсказуемости движения астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли // *Вестн. СибГАУ.* — 2011. — Вып. 6(39). — С. 9—14.
6. *Раздымакина О. Н., Галушина Т. Ю.* О предсказуемости движения астероидов, проходящих через сферу Хилла Земли // *Вестн. ТГУ. Математика и механика.* — 2012. — Вып. 3(19). — С. 78—86.
7. *Wisdom J.* Chaotic behavior and origin of the 3/1 Kirkwood gap // *Icarus*. — 1983. — Vol. 56. — P. 51—74.
8. *Cincotta P. M., Girdano C. M., Simo C.* Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // *Physica D.* — 2003. — Vol. 182. — P. 151—178.
9. *Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю., Раздымакина О. Н.* Сравнительный анализ численных методов оценивания времени предсказуемости движения АСЗ // *Изв. вузов. Физика.* — 2011. — Т. 54, вып. 6/2. — С. 22—30.
10. *Bowell E., Muinonen K., Wasserman L. H.* A public-domain asteroid data base // *In Asteroids, Comets, Meteors, Kluwer, Dordrecht, Netherlands.* — 1994. — P. 477—481.

11. *Шевченко И. И.* Непредсказуемые орбиты // Природа. — 2010. — Вып. 4. — С. 12—21.
12. *Kankiewicz P., Wlodarczyk I.* Stability of the Most Hazardous Mars-Crossers // Acta Astronomica. — 2006. — Vol. 56. — P. 413—425.

80 ЛЕТ РАДИОАСТРОНОМИИ. ЧТО ДАЛЬШЕ?

Кратко описываются основные технические и научные достижения радиоастрономии за 80 лет ее истории и обсуждаются перспективы ее развития в сравнительно близком и более далеком будущем.

We briefly describe the main technical and scientific achievements of radio astronomy in 80 years of its history and discuss prospects of its development in relatively near and far future .

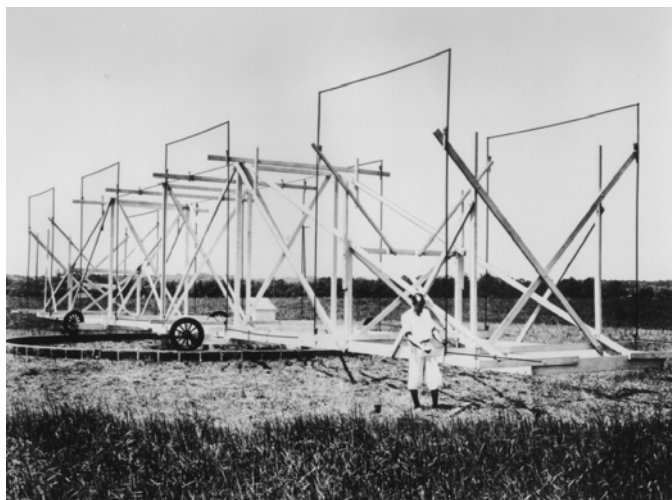
Введение

В 1932 г. радиоинженер Карл Янский, занимаясь изучением радиопомех (см. рисунок), впервые обнаружил внеземное радиоизлучение. Ему даже удалось установить, что пик данного излучения приходится на область центра нашей Галактики. 5 мая 1933 г. сообщение об этом открытии появилось на первой полосе New York Times. Но оно не заинтересовало астрономическую общественность того времени. Лишь несколько лет спустя другой радиолобитель, Гроут Ребер, продолжил эти исследования, получив первые карты неба в радиодиапазоне, после чего и началось бурное развитие радиоастрономии.

Достижения

Техника радиоастрономии

Со времени зарождения радиоастрономии чувствительность, угловое разрешение и другие параметры радиоастрономических инструментов улучшились на много порядков. Частотный диапазон радиоастрономических наблюдений с поверхности Земли простирается от ~ 10 МГц до ~ 1 ТГц и ограничивается только пропусканием радиоволн нейтральной атмосферой и ионосферой. Построен ряд полноровотных антенн диаметром ~ 100 м, что является пределом для такой конструкции на поверхности Земли. Антенны, расположенные на разных континентах, объединены в глобальную интерферометрическую сеть, что позволяет добиться углового разрешения,



Антенна Карла Янского (20.5 МГц, 1932 г.) (слева); космический радиотелескоп «Радиоастрон» (справа)

недостижимого пока в других диапазонах. Спектральное разрешение, реализуемое в радиоастрономии, также значительно лучше, чем на более высоких частотах.

Следующий важный шаг в развитии техники радиоастрономии связан с выводом радиотелескопов в космос. В 1997 г. был запущен японский спутник HALCA (the Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy) диаметром 8 м в рамках эксперимента VSOP (VLBI Space Observatory Program) [1]. Апогей орбиты спутника составлял около 20 000 км, а рабочий диапазон от ~ 1 до ~ 20 см. В 2009 г. Европейское космическое агентство запустило аппараты Herschel [2] и Planck [3], работающие в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн, а 18 июля 2011 г. Россией был запущен космический радиотелескоп «Радиоастрон» диаметром 10 м (см. рисунок), работающий на волнах от ~ 1 см до ~ 1 м [4] (проект Астрокосмического центра ФИАН). Herschel и Planck были предназначены для автономной работы, а основная задача «Радиоастрона» — проведение интерферометрических измерений в комплексе с крупными наземными антеннами на базе до $\sim 300\,000$ км. На «Радиоастроне» успешно прошли тестовые измерения во всех диапазонах, в том числе в интерферометрическом режиме. Получены первые научные результаты [5].

Научные результаты

Невозможно в коротком обзоре описать достижения радиоастрономии. По сути данные радиоастрономических наблюдений революционизировали наши представления о Вселенной. Достаточно упомянуть открытия микроволнового «реликтового» фона, квазаров, пульсаров, космических мазеров, множества межзвездных молекул, в том числе сложных органических соединений и пр. Благодаря радиоастрономии удалось исследовать многие объекты и явления, которые практически ненаблюдаемы в других участках спектра электромагнитных волн. Некоторые выдающиеся открытия были отмечены Нобелевскими премиями.

Актуальные задачи

Имеется очень большое число актуальных радиоастрономических задач. К наиболее фундаментальным можно, по-видимому, отнести следующие.

Исследования ранней Вселенной. В настоящее время отсутствует какая-либо наблюдательная информация о Вселенной между эпохой рекомбинации ($z \sim 1\,000$) и эпохой, в которую сейчас наблюдаются наиболее далекие объекты ($z \sim 10$). По этой причине этот период называется «Темными веками». В стандартных космологических моделях это первые сотни миллионов лет эволюции Вселенной. Именно в то время происходило формирование первых структур во Вселенной, и, конечно, изучение «Темных веков» — мечта астрофизиков. Как сейчас представляется, наиболее реальный путь сделать это — изучить искажения спектра микроволнового фона, которые могли быть вызваны атомами и молекулами, существовавшими в ту эпоху (например, [6]). Ожидаемые эффекты чрезвычайно малы, и их обнаружение потребует очень серьезных усилий.

Информацию о первых мгновениях жизни Вселенной можно надеяться получить из наблюдений поляризации микроволнового фона. Гравитационные волны, возникающие в это время, должны были оставить отпечаток в виде специфической поляризации фона. Поискам такой поляризации посвящены текущие (например, Planck [3]) и планируемые радиоастрономические проекты.

Природа темной материи и темной энергии. В настоящее время считается надежно установленным существование и темной материи, и так называемой темной энергии, которые составляют основную часть массы-энергии Вселенной. Природа их совершенно не ясна; радиоастрономия, видимо, может внести свой вклад в решение этой загадки.

Проверка фундаментальных физических теорий. Теории, лежащие в основе современной физики, нуждаются, конечно, в тщательной проверке. Радиоастрономия позволяет провести высокоточные астрометрические измерения, тайминг пульсаров и пр., необходимые, в частности, для точной проверки общей теории относительности.

Одним из фундаментальных вопросов является постоянство фундаментальных констант. В принципе они могут меняться и со временем, и в зависимости от локальных условий (например, барионной плотности). Радиоастрономические методы позволяют исследовать возможные вариации с очень высокой точностью [7].

Образование звезд и галактик. Проблемы образования звезд и галактик остаются одними из центральных в астрофизике. Радиоастрономия вносит основной вклад в их исследования. Многие ключевые вопросы в этой области требуют создания более совершенных инструментов с более высокой чувствительностью и угловым разрешением.

Происхождение жизни. Вопросы о том, как возникла жизнь, насколько широко она распространена в космосе, пока не имеют ответа. Обнаружение тысяч экзопланет и сложных органических соединений в космосе, возможно, приближает разгадку. Новые радиоастрономические проекты нацелены на решение и этой проблемы.

Ближние перспективы

Планы развития радиоастрономической техники на ближайшие 10—15 лет более или менее определены. Во-первых, это, конечно, завершение уже начатого строительства ряда выдающихся по своим характеристикам инструментов — ALMA, LOFAR и некоторых других. Во-вторых, в этот период должны быть реализованы некоторые

уже одобренные очень амбициозные проекты. Из наземных это в первую очередь SKA, из космических — «Миллиметронтрон». Ниже мы коротко опишем основные разработки.

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)

Наиболее амбициозный проект современной миллиметровой и субмиллиметровой астрономии — Большая Миллиметровая Решетка в Атакаме (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array — ALMA), строительство которой ведется в настоящее время на высоте 5 000 м в пустыне Атакама в Чилийских Андах совместными усилиями ряда организаций США, Европы и Японии. Этот инструмент будет состоять примерно из 60 12-м антенн с расстояниями между ними до 16 км, а также из компактной решетки, включающей в себя 12 7-м антенн и 4 12-м. Точность поверхности антенн около 20 мкм, что в сочетании с высокой прозрачностью атмосферы в этом районе обеспечивает рабочий диапазон до ~ 900 ГГц.

Рабочий диапазон разбит на 10 поддиапазонов, лишь два первых поддиапазона (до длины волны 3 мм) выполнены по схеме с НЕМТ на входе, остальные построены на основе СИС смесителей. Учитывая значительный масштаб тиражирования приемников, они созданы в унифицированной технологии — идентичных по посадочным габаритам картриджей для всех диапазонов. Картриджи с приемниками монтируются в унифицированные входные модули антенн, построенных на базе криостатов, охлажденных криорефрижераторами замкнутого цикла гелиевого (4К) уровня температуры. ALMA стала крупнейшим заказчиком и уникальным полигоном по отработке технологии приемников ММ и СубММ волн.

Строительство идет полным ходом. В 2011 г. уже прошел «нулевой» цикл наблюдений, в котором были задействованы 16 антенн и часть рабочих диапазонов. В 2013 г. запланирован первый цикл наблюдений с участием 32 антенн.

Square Kilometre Array (SKA)

Проект SKA предполагает создание гигантского антенного комплекса, состоящего из нескольких тысяч антенн с базами между ними до нескольких тысяч километров с общей собирающей поверхностью около 1 км², что на два порядка превышает площадь самых больших существующих радиотелескопов. Планируемый рабочий диапазон — от 70 МГц до 30 ГГц. Принято решение строить эту

систему сразу на двух континентах — в Южной Африке и Австралии. Строительство должно начаться в 2016 г. и полностью завершиться к 2024 г. Для SKA определены следующие ключевые научные задачи [8]:

Колыбель жизни. Этот проект нацелен на поиск планет земного типа у других звезд и поиск проявлений разумной жизни.

Исследования «Темных веков» Вселенной. Планируется изучение периода жизни Вселенной между эпохой рекомбинации и эпохой образования первых звезд и галактик.

Происхождение и эволюция космического магнетизма. Эта задача посвящена исследованиям происхождения магнитного поля галактик, звезд и планет, а также влияния магнитного поля на образование звезд и галактик.

Проверка теорий гравитации по наблюдениям пульсаров и черных дыр. Предполагаются проверка общей теории относительности Эйнштейна, поиск и исследование черных дыр, гравитационных волн и т. п.

Эволюция галактик, космология и темная материя. Этот проект направлен на исследование образования и эволюции галактик, а также на поиск ответа на вопрос о природе темной энергии.

LOW Frequency ARray (LOFAR)

Это европейский проект (ведущая организация — нидерландский институт ASTRON), предполагающий строительство кластеров низкочастотных (10—240 МГц) антенн на территории диаметром более 1 500 км, охватывающей несколько европейских стран. Общее количество антенн — около 7 000.

70-м радиотелескоп РТ-70 на плато Суффа, Узбекистан

Согласно проекту 70-м радиотелескоп на плато Суффа должен работать на волнах до ~ 1 мм. Его строительство началось более 20 лет назад, но после распада СССР было заморожено. В настоящее

время решается вопрос возобновления строительства радиотелескопа, а также ведутся работы по доработке проекта телескопа с учетом современных технологических возможностей. Он должен стать крупнейшим инструментом коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн в мире с эффективной площадью, сравнимой с суммарной площадью всех антенн интерферометра ALMA.

Аппаратурный комплекс радиотелескопа РТ-70, помимо специализированных аппаратных и программных средств антенной системы, не рассматриваемой здесь, будет состоять из набора основной приемной аппаратуры, представляющей собой линейку различных высокочувствительных приемных устройств, работающих на частотах от ~ 22 до ~ 300 ГГц. Кроме того, в его состав входят обработочный комплекс, способный обеспечивать преобразование, оцифровку и обработку получаемой с приемных устройств информации, а также набор сервисных и обслуживающих аппаратных комплексов: система мониторинга атмосферного поглощения, система контроля поверхности зеркала (включая приемники для радиоголографии), аппаратный лабораторный комплекс для тестирования и регулировки рабочих приемников, высокоскоростная система передачи данных, криогенное и метрологическое оснащение и т. д.

Проект «Миллиметрон»

Следующим важным шагом в развитии космической радиоастрономии может стать российский проект «Миллиметрон», включенный в федеральную космическую программу до 2016 г. Предполагается запуск телескопа с зеркалом диаметром 10 м, которое только за счет радиационных экранов будет охлаждаться до 50 К. Изучается возможность активного охлаждения зеркала до ~ 4 К. Рабочий диапазон, по крайней мере центральной части зеркала, должен простирается в средний ИК диапазон. Огромный по сравнению с другими космическими телескопами размер зеркала и его охлаждение должны обеспечить беспрецедентную чувствительность по плотности потока, ~ 5 мкЯн при интегрировании в течение 1 ч [9], что на несколько порядков превосходит чувствительность инструментов аппарата Herschel. Предполагается использование «Миллиметрона» в режиме РСДБ совместно с наземными радиотелескопами.

Далекие фантазии

Возможности радиоастрономических наблюдений с поверхности Земли довольно сильно ограничены. Нейтральная атмосфера и ионосфера лимитируют частотный диапазон. Гравитационные деформации не позволяют создать достаточно большие высокоточные антенны. Максимальная база интерферометров ограничена размерами Земли. Поэтому далекие перспективы радиоастрономии, несомненно, связаны с космическими инструментами. Первые достижения в этом плане уже имеются (например, «Радиоастрон»). Конечно, трудно предсказать темпы развития космической техники на десятилетия вперед; так, большинство прогнозов 50-летней давности были, очевидно, слишком оптимистичны. Тем не менее к концу нынешнего века можно, видимо, ожидать достаточно активной деятельности человечества в пределах Солнечной системы. Можно думать о создании гигантских антенн сравнительно небольшой массы (поскольку нет гравитационных деформаций) и интерферометров с базой порядка астрономической единицы, что на три порядка больше базы «Радиоастрона». Угловое разрешение такого интерферометра может достигать наносекунд дуги, что может позволить, например, получать изображения черных дыр в ядрах близких галактик.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 12-02-00861 и 11-02-12284-офи-м-2011, а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (лот 2012-1.2.1-12-000-1012, соглашение 8421).

Библиографические ссылки

1. *Hirabayashi H.* The VSOP Mission – A New ERA for VLBI // IAU Colloq. 164: Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources / ed. by J. A. Zensus, G. B. Taylor, J. M. Wrobel : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 1998. — Vol. 144. — P. 11.
2. *Pilbratt G. L., Riedinger J. R., Passvogel T. et al.* Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L1. 1005.5331.
3. *Tauber J. A., Planck Collaboration.* The Planck mission // *Memorie della Societa Astronomica Italiana.* — 2012. — Vol. 83. — P. 72.
4. *Александров Ю. А., Андреянов В. В., Бабакин Н. Г. и др.* Радиоастрон (проект «Спектр-Р») — радиотелескоп много больше

- Земли. Основные параметры и испытания // Вестн. ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. — 2011. — № 3. — С. 11—19.
5. *Авдеев В. Ю., Алакоз А. В., Андрианов А. С. и др.* Космическая миссия «Радиоастрон». Первые результаты // Вестн. ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. — 2012. — № 3. — С. 4—21.
 6. *Зинченко И. И.* Молекулы в ранней Вселенной // Физика Космоса : Тр. 41-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2012 г, Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 71—80.
 7. *Лапинов А. В., Левшаков С. А., Козлов М. Г. и др.* Исследование фундаментальных свойств Вселенной на основе прецизионной спектроскопии молекул. — 2012. — № 1(73). — С. 54—61.
 8. *Schilizzi R. T., Dewdney P. E. F., Lazio T. J. W.* The square kilometre array // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2010. — Vol. 7733.
 9. *Смирнов А. В., Барышев А. М., де Бернардис П. и др.* Текущий этап разработки приемного комплекса космической обсерватории «Миллиметрон» // Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика. — 2011. — Т. 54, № 8—9. — С. 617—630.

ДИНАМИКА КРАТНЫХ ЗВЕЗД: НОВОЕ И ХОРОШО ЗАБЫТОЕ СТАРОЕ

Обсуждаются проблемы динамической эволюции и устойчивости кратных звезд в Галактическом регулярном и иррегулярном поле. Тесные системы с сильной иерархией, вероятно, динамически устойчивы на космогонических временах порядка сотен миллионов и миллиардов лет. Неиерархические системы типа Трапеции Ориона распадаются на характерных временах порядка миллионов лет. При этом формируются двойные системы и кратные системы с сильной иерархией. Выделяется популяция систем со слабой иерархией, которые находятся вблизи границы устойчивости. Эти системы могут быть сильно чувствительны к внешним воздействиям. Их долговременная эволюция может проявлять свойства стохастичности. Обсуждаются различные сценарии формирования кратных звезд: распад звездных скоплений и малых групп звезд; совместное формирование при фрагментации вращающегося диска; аккреция газа и пыли на зародыши кратных систем; миграция орбит за счет приливных сил и эффекта Лидова—Кодзай. Особый интерес представляет динамика широких кратных систем с размерами в десятки и сотни тысяч астрономических единиц в поле Галактики. Эти системы могут использоваться для тестирования различных теорий гравитации в случае малых ускорений.

We discuss the problems of the dynamic evolution and stability of multiple stars in the Galactic regular and irregular field. Close systems with a strong hierarchy are probably dynamically stable on cosmological time scales of hundreds of millions and billions of years. Non-hierarchical systems like the Orion Trapezium break on the typical time scales of millions of years. As a result of disruption, double and multiple systems with a strong hierarchy are formed. The special interesting class are the systems with a weak hierarchy which are located near the boundary of stability. These systems can be highly sensitive to external perturbations. Their long-term evolution may exhibit properties of stochasticity. We discuss various scenarios of formation of multiple stars: the disruption of star clusters and small groups of stars; joint formation in the fragmentation of the rotating disk; accretion of gas and dust into the nuclei of multiple systems; migration of the orbits due to tidal forces and Lidov—Kozai effect. Of particular interest is the dynamics of a wide multiple systems with dimensions of tens and hundreds of thousands of astronomical units in the field of the Galaxy. These systems can be used to test different theories of gravity in the case of small accelerations.

Введение

Кратные звезды широко представлены как среди звезд ближайшей окрестности Солнца, так и в областях активного звездообразования. Можно предположить, что вхождение звезды в кратную систему является скорее правилом, чем исключением. Довольно трудно оценить истинное число компонентов в конкретной системе, поскольку всегда есть опасность упустить далекие слабые спутники, не разделить близкие тесные системы и не отследить компоненты на промежуточных уровнях иерархии.

Кратные системы по своему устройству можно разделить на два широких класса: иерархические системы, прототипом которых является четверная звезда ϵ Лир, и неиерархические системы (прототип — кратная система Трапеция Ориона).

Следует отметить, что отношение периодов внешней и внутренней подсистем для большей части кратных систем ближайшей окрестности Солнца превосходит 10, то есть почти все системы являются сильно иерархическими.

Иерархия структуры кратной системы тесно связана с ее устойчивостью. В иерархической системе можем выделить несколько подсистем, движения в которых мы можем рассматривать как возмущенные кеплеровские движения. В системах с сильной иерархией возмущения будут малы и кратная система будет динамически устойчива на космогонических временах. В системах со слабой иерархией возмущения могут быть значительны и могут в конце концов привести к распаду кратной системы. Неиерархические кратные звезды, по-видимому, являются динамически неустойчивыми в подавляющем большинстве случаев. Редкие исключения могут составлять системы, в которых движения компонентов происходят в окрестности устойчивой периодической орбиты.

Для того чтобы разделить устойчивые и неустойчивые кратные системы, можно использовать известные критерии устойчивости или провести численное моделирование динамики в случае тройных систем. Для четверных систем и систем большей кратности в общем случае пока не разработаны аналитические критерии устойчивости. Исключение составляет специальный случай задачи четырех тел — так называемая Каледонская задача, когда иерархическая четверная система состоит из двух динамически симметричных пар (см., например, [1]). В общем случае анализ динамической устойчивости таких систем можно исследовать только с помощью численного решения уравнений движения гравитационной задачи N -тел, выбирая начальные условия в соответствии с данными наблюдений.

Заметим, что для задачи трех тел имеется полученное 100 лет назад аналитическое решение Сундмана в виде равномерно и абсолютно сходящихся рядов [2], однако это решение оказалось невозможно применить на практике из-за чрезвычайно медленной сходимости рядов Сундмана.

Динамическая устойчивость кратных звезд

При изучении устойчивости тройных систем можно в принципе использовать ряд аналитических критериев устойчивости, позволяющих проанализировать выбранную тройную звезду на устойчивость без применения моделирования. Эти критерии были получены либо аналитически при некоторых допущениях, либо с помощью аппроксимации (с некоторой погрешностью) границы области устойчивости в фазовом пространстве (обычно в сечении) некоторой поверхностью по результатам численных экспериментов. Поэтому при

их применении всегда существует определенная вероятность неправильного вывода об устойчивости исследуемой системы. Требуется проведение численного моделирования для контроля заключения об устойчивости или неустойчивости.

Для кратных систем с числом компонентов, равным четырем и более, аналитических критериев динамической устойчивости в общем случае пока не получено, поэтому численное моделирование является единственным способом выяснить, устойчива или неустойчива избранная кратная система. При этом следует иметь в виду два обстоятельства.

Во-первых, в некоторых системах наблюдаются тесные двойные с короткими периодами, сильно изолированные от других компонентов и подсистем. В таких случаях при анализе динамической устойчивости можно рассматривать такие двойные как одиночные объекты с массой, равной сумме масс компонентов пары.

Во-вторых, численный анализ динамики кратной системы всегда возможен только на ограниченном интервале времени. Кроме того, численный анализ отягощен ошибками начальных условий, связанными с ошибками наблюдений, а также погрешностями численного интегрирования дифференциальных уравнений движения. Поэтому полученные из численных экспериментов выводы о динамической устойчивости или неустойчивости той или иной кратной системы нельзя считать окончательными. Их можно рассматривать только на вероятностном уровне.

Динамика и происхождение кратных звезд

В работе Токовина [3] было рассмотрено несколько процессов, участвующих в формировании кратных звезд:

- фрагментация газопылевых облаков;
- аккреция окружающего вещества на протозвезды;
- гравитационное взаимодействие в рамках задачи N тел;
- миграция орбит.

Фрагментация, по-видимому, является доминирующим процессом в формировании кратных протозвезд из турбулентной межзвездной газопылевой среды. В работе Токовина [3] приводятся ссылки на работы по исследованию коллапса изолированного газового ядра,

находящегося в турбулентном состоянии. В результате коллапса возникают отдельные волокна. Затем из сгущений газа в волокнах или в областях пересечения волокон возникают звезды или подсистемы звезд.

Аккреция окружающего газа на сформировавшиеся звезды и подсистемы начинает активно проявлять себя на более поздних стадиях эволюции кратных звезд. В результате аккреции могут формироваться двойные подсистемы с очень сходными по физическим характеристикам компонентами — «близнецами».

Динамика малых групп и скоплений звезд в рамках гравитационной задачи N тел в значительной мере определяет судьбу неиерархических систем. В результате динамической эволюции такие системы разрушаются. В процессе разрушения из систем выбрасываются одиночные звезды и двойные подсистемы. В финале остается двойная или иерархическая устойчивая кратная система. Однако, по утверждению Токовина [3], образующиеся кратные системы имеют слишком малые отношения периодов и слишком большие эксцентриситеты внешних подсистем. Присутствие газа в группе может существенно повлиять на характеристики формирующихся кратных систем (см., например, [4]). Свойства образующихся в этом случае кратных систем на качественном уровне согласуются со свойствами наблюдаемых кратных звезд в молодых звездных скоплениях и звездном поле.

Существует несколько механизмов миграции орбит в кратных звездах (см. [3]): взаимодействие звезд с газовыми дисками как в случае экзопланет; взаимодействие звезд с джетами и магнитным ветром; кумулятивный эффект механизма Лидова—Кодзай и приливного трения (см., например, [5]). Последний эффект приводит к сокращению периода внутренних двойных и увеличению иерархии кратной системы. Таким образом могут формироваться кратные звезды, в состав которых входят тесные двойные с орбитами, близкими к круговым.

Динамика и конфигурации кратных звезд

Следует заметить, что должна существовать статистическая связь между характером динамической эволюции наблюдаемых кратных звезд и распределением их конфигураций. На этот факт впервые обратил внимание Т. А. Агекян [6].

Следует учитывать, что наблюдаемые конфигурации кратных звезд не являются их истинными конфигурациями. Они являются результатом проекции компонентов системы на картинную плоскость. Поэтому в действительности некоторые иерархические системы могут оказаться неиерархическими, и наоборот. Впервые этот вопрос исследовал В. А. Амбарцумян в 1951 г. [7]. Он показал при некоторых предположениях, что 7 % иерархических тройных систем проектируются в неиерархические системы типа Трапеции Ориона.

Т. А. Агекян в 1954 г. [6] получил более общий результат: он вывел двумерное интегральное уравнение, которое связывает распределения истинных и видимых конфигураций тройных звезд при предположении о равновероятности всех ориентаций плоскостей тройных звезд.

Т. А. Агекян и Ж. П. Аносова [8] численно решили это уравнение для наблюдаемых визуальных тройных звезд, тройных галактик и модельных динамически неустойчивых тройных систем. Оказалось, что распределения согласуются на качественном уровне. Из этого факта Т. А. Агекян и Ж. П. Аносова [8] сделали вывод о возможной динамической неустойчивости большинства наблюдаемых визуальных тройных звезд и тройных галактик.

За прошедшее с выхода работ В. А. Амбарцумяна, Т. А. Агекяна и Ж. П. Аносовой время появилось много нового наблюдательного материала как для тройных звезд, так и для триплетов галактик. Поэтому было бы интересно применить этот метод к новым данным и проверить, насколько гипотеза о динамической неустойчивости этих систем согласуется с наблюдениями.

Динамика избранных кратных звезд

Особый интерес представляет динамическая устойчивость кратных звезд на космогонических временах порядка миллионов лет и более. Молодые неиерархические системы, наблюдающиеся в областях звездообразования, вероятно, динамически неустойчивы. За времена порядка миллионов лет они распадаются на одиночные, двойные и иерархические кратные подсистемы. Тесные системы с сильной иерархией будут устойчивы на временах, сравнимых с возрастом Галактики: внешнее поле Галактики вносит лишь слабые возмущения в орбиты компонентов в таких системах, и движения компонентов близки к кеплеровским. Широкие кратные системы с характерными размерами порядка астрономических единиц подвергаются силь-

ным возмущениям со стороны внешнего приливного регулярного поля Галактики и проходящих мимо системы массивных объектов поля (звезд, звездных скоплений, молекулярных облаков и др.). Особый промежуточный класс составляют кратные звезды со слабой иерархией. Эти системы находятся вблизи границы динамической устойчивости, поэтому движения компонентов в таких системах могут обладать признаками хаотичности, и динамическая эволюция системы может завершиться ее распадом.

Для анализа динамической устойчивости конкретных избранных кратных звезд можно использовать различные подходы: 1) известные в литературе аналитические и полуаналитические критерии устойчивости; 2) проведение численного моделирования динамической эволюции системы на временах порядка миллиона лет и более.

Нами были рассмотрены динамическая эволюция и устойчивость ряда кратных звезд, в основном со слабой иерархией. Наиболее интересными оказались объекты HD 40887, HD 76644 (ι UMa), HD 136176, HD 150680, HD 217675/6 (o And), HD 222326 и HD 284419 (T Tau), а также широкая система с сильной иерархией HD 137391/2 (51 Boo = ADS 9626). Уточнены элементы орбит подсистем в этих кратных звездах и массы компонентов. Использованы данные из литературы и результаты оригинальных спектральных наблюдений на 1.5-м российско-турецком телескопе РТТ 150 (обсерватория ТЮБИТАК, Турция), спекл-интерферометрических наблюдений на 6-м телескопе БТА САО РАН и позиционных наблюдений на 26-дюймовом рефракторе ГАО РАН. Для уточнения элементов орбит применялись классический метод Тиле—Иннеса, метод дифференциальных поправок и метод параметров видимого движения, разработанный в ГАО РАН. Для определения динамической устойчивости рассмотренных систем использовались критерии устойчивости тройных систем и численное интегрирование уравнений движения задачи N тел. Оценены области динамической устойчивости и неустойчивости на множестве орбитальных параметров и масс компонентов. Обсуждаются возможные сценарии нарушения устойчивости: сближения с массивными объектами поля Галактики, временный захват звезды поля двойной или кратной системой, физическая молодость системы, является ли система продуктом распада системы большей кратности или звездного скопления, слияние компонент в кратной системе.

Для ряда систем вывод о неустойчивости, сделанный по опубликованным ранее данным, явился следствием ошибочного определения параметров подсистем и не был подтвержден при уточнении характеристик исследуемых звезд.

Система HD 40887 является четверной (см. [9]). Ее динамическая устойчивость критическим образом зависит от элементов орбиты внешней подсистемы. Для надежного решения вопроса о ее устойчивости требуется более уверенное определение периода и эксцентриситета этой подсистемы.

Система HD 76644 (ι UMa) также четверная с сильно вытянутой внешней орбитой — эксцентриситет около 0.9. Система динамически неустойчива с вероятностью более 0.98. Время разрушения не превышает миллиона лет (см. [10]). Несмотря на требуемое уточнение параметров, полученные данные уже позволяют поставить систему HD 76644 в один ряд с объектом V505 Sgr, для которого в работе [11] указано на вероятное наблюдение тесного сближения звезд или же временного захвата звезды поля. Подобные результаты, возможно, потребуют пересмотра «классических» взглядов на частоту образования неустойчивых систем и тесного взаимодействия звезд в окрестностях Солнца.

В системе HD 136176, считавшейся тройной, в данных из литературы имеется несоответствие между отношениями больших полуосей орбит внешней и внутренней двойных, полученными непосредственно и из отношения периодов. Различие достигает порядка величины. В первом случае система находится глубоко в области устойчивости, а во втором она, вероятно, неустойчива. Но наши наблюдения и анализ опубликованных позиционных данных почти за 200 лет указывают, что, вероятно, система является двойной, наличие третьего компонента не подтверждено.

Для тройной системы HD 150680 также требуется уточнение орбитальных элементов обеих подсистем и масс компонентов.

Система HD 217675/6 (ϕ And) является четверной системой. Орбитальные параметры одной из внутренних подсистем и внешней подсистемы определяются довольно уверенно. Однако орбитальные характеристики второй внутренней подсистемы определяются неоднозначно. После уточнения параметров орбит был с высокой долей вероятности опровергнут предварительный вывод о динамической неустойчивости системы (см. [12]).

Система HD 222326 (ADS 16904), возможно, является четверной. По результатам анализа физических и орбитальных параметров система, вероятно, динамически устойчива на временах не менее миллиона лет. Интересно отметить, что по крайней мере три известные компоненты этой системы уже покинули главную последовательность (см. [13]).

Статус кратной системы HD 284419 (Т Тау) не вполне определен. Даже число компонентов (три или четыре) нуждается в уточнении. Орбитальное решение для внешней двойной подсистемы также неоднозначно. Показано, что в зонах малых (меньше 300 лет) и больших (более 5 500 лет) периодов система, вероятно, неустойчива на временах менее 10 млн лет, тогда как в зоне промежуточных значений периода система, вероятно, динамически устойчива. Ситуация осложняется из-за приблизительной ортогональности орбитальных плоскостей внутренней и внешней двойных (см. [14]).

Широкая система HD 137391/2 (51 Boo=ADS 9626), вероятно, является четверной, состоящей из двух тесных двойных, испытывающих сближение по относительной гиперболической орбите. Расстояние между двойными системами в проекции на картинную плоскость составляет примерно 3 900 а. е. Таким образом, мы, вероятно, наблюдаем сближение двух двойных звезд в Галактическом поле.

Динамика широких кратных звезд в поле Галактики

Тогда как в тесных кратных системах динамическая эволюция определяется гравитационным взаимодействием компонентов, в широких системах, размеры которых сравнимы с приливными радиусами систем, существенна роль внешнего Галактического поля. Каталог таких систем представлен в работе [15]. Ближайшая к Солнцу тройная система, состоящая из визуальной двойной α Центавра АВ и удаленного компонента Proxima Центавра, также относится к данному классу объектов. Широкие кратные системы входят в состав движущихся групп (см., например, [16]).

Динамическая эволюция широких пар в регулярном поле Галактики с учетом сближений со звездами поля рассматривалась, в частности, в работе [17]. Изучалась эволюция системы в связанном состоянии и после потери гравитационной связи. Отмечены различные особенности распределения пространственного расстояния между компонентами пары, в частности, минимум на расстоянии, рав-

ном несколькими радиусам Якоби, и максимум на расстоянии ~ 100 — 300 пк. Эти особенности слабо зависят от начального распределения элементов орбит двойных и могут быть выявлены из наблюдений.

Свойства орбит компонентов в широких парах с расстояниями порядка 1 пк рассматривались также в работе Макарова [18]. В ней было показано, что возможны как устойчивые движения на временах $\sim 10^{10}$ лет, так и распады пар под действием внешнего регулярного поля Галактики. Результаты сильно чувствительны к начальным условиям. Граница области устойчивости обладает признаками фрактальности. Возможен также захват первоначально не связанных звезд за счет поля Галактики с образованием широкой гравитационно связанной системы.

Еще один интересный аспект динамики широких кратных систем состоит в том, что относительные ускорения компонентов очень малы: они составляют $\sim 10^{-8}$ см/с² и менее. А это область ускорений, где работает модифицированная ньютоновская динамика (MOND), предложенная в 1983 г. Мильгромом [19]. Поэтому в принципе широкие кратные системы можно использовать для тестирования теории гравитации. Первые исследования в этом направлении уже проводятся [20]. В упомянутой работе построены возможные орбиты звезды Proxima Центавра относительно α Центавра АВ в ньютоновской динамике и в MOND. При одних и тех же начальных условиях в рамках MOND орбита получается более широкой и менее вытянутой, чем в ньютоновской динамике. Для выяснения вопроса о связанности системы требуется существенное уточнение лучевой скорости удаленного компонента Proxima Центавра.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-00185-а.

Библиографические ссылки

1. *Szell A., Steves B., Erdi B.* The hierarchical stability of quadruple stellar and planetary systems using the Caledonian Symmetric Four-Body Model // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 427. — P. 1145—1154.
2. *Sundman K.* Mémoire sur le problème des trois corps // *Acta Mathematica.* — 1912. — Vol. 36. — P. 105—179.
3. *Tokovinin A. A.* Comparative statistics and origin of triple and quadruple stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 389. — P. 925—938.

4. *Delgado-Donate E. J., Clarke C. J., Bate M. R., Hodgkin S. T.* On the properties of young multiple stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 351. — P. 617—629.
5. *Kiseleva L. G., Eggleton P. P., Mikkola S.* Tidal evolution of triple stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1998. — Vol. 300. — P. 292—302.
6. *Агекян Т. А.* Распределение истинных конфигураций тройных звезд // *Астрон. журн.* — 1954. — Т. 31. — С. 544—549.
7. *Амбарцумян В. А.* О вероятности кажущихся кратных систем типа Трапеции Ориона // *Докл. АН Армян. ССР.* — 1951. — Т. 13, № 4. — С. 97—103.
8. *Агекян Т. А., Аносова Ж. П.* О количестве неустойчивых систем среди тройных звезд и галактик // *Тр. Астрон. обсерватории ЛГУ.* — 1964. — Т. 21. — С. 103—117.
9. *Tokovinin A., Kiyaeva O., Sterzik M. et al.* An old nearby quadruple system Gliese 225.2 // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 441. — P. 695—699.
10. *Жучков Р. Я., Малоголовец Е. В., Кияева О. В. и др.* Физические параметры и динамические свойства кратной системы ι UMa (ADS 7114) // *Астрон. журн.* — 2012. — Т. 89. — С. 568—580.
11. *Broz M., Mayer P., Pribulla T. et al.* A unified solution for the orbit and light-time effect in the V505 Sgr system // *Astron. J.* — 2010. — Vol. 139. — P. 2258—2268.
12. *Жучков Р. Я., Малоголовец Е. В., Кияева О. В. и др.* Физические параметры и динамические свойства кратной звезды σ And // *Астрон. журн.* — 2010. — Т. 87. — С. 1230—1246.
13. *Жучков Р. Я., Малоголовец Е. В., Балега Ю. Ю. и др.* Физические параметры и динамические характеристики кратной системы HD 222326 // *Астрон. журн.* — 2008. — Т. 85. — С. 611—622.
14. *Жучков Р. Я., Кияева О. В., Орлов В. В.* Критерии устойчивости тройных систем и их применение к наблюдаемым кратным звездам // *Астрон. журн.* — 2010. — Т. 87. — С. 43—53.
15. *Shaya E. J., Olling R. P.* Very wide binaries and other comoving stellar companions: a Bayesian analysis of the HIPPARCOS Catalogue // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2011. — Vol. 192, № 2. — P. 1—17.

16. *Caballero J. A.* Reaching the boundary between stellar kinematic groups and very wide binaries. II. α Librae + KU Librae: a common proper motion system in Castor separated by 1.0 pc // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 514, № 98. — P. 1—7.
17. *Jiang Y.-F., Tremaine S.* The evolution of wide binary stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 401. — P. 977—994.
18. *Makarov V. V.* Stability, chaos and entrapment of stars in very wide pairs // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 421. — P. L11—L13.
19. *Milgrom M.* A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis // *Astrophys. J.* — 1983. — Vol. 270. — P. 365—370.
20. *Beech M.* The orbit of Proxima Centauri: a MOND versus standard Newtonian distinction // *Astrophys. Space. Sci.* — 2011. — Vol. 333. — P. 419—426.

КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР — ПАРАДОКС ХХІ СТОЛЕТИЯ

В лекции рассматриваются нормативно-правовые вопросы проблемы космического мусора, оценка состояния околоземного космического пространства. Приведены оценка характеристик космического мусора, анализ опасных ситуаций, создаваемых фрагментами разрушенных космических аппаратов. Дан обзор современных зарубежных средств мониторинга околоземных орбит. Рассмотрены оптические средства контроля космического мусора и способы борьбы с техногенным загрязнением космического пространства.

Введение

Современный этап освоения космоса характеризуется парадоксальной ситуацией: чем больше запускается космических аппаратов (КА) в космос, тем менее пригодным он становится для дальнейшего использования. Засорение околоземного космического пространства (ОКП) космическим мусором приближается к критическому уровню.

Полвека назад, 29 июня 1961 г., произошел первый взрыв в космосе. Ракетоноситель США Ablestar вывел на орбиту один из первых навигационных спутников серии «Транзит-4А» и еще два малых спутника на высоту 800—1 000 км. Миссия прошла успешно, но на 77-й минуте взорвался топливный бак ракеты. Облако обломков наблюдалось на высоте до 2 000 км. Было зафиксировано 300 крупных фрагментов, до сих пор на орбитах остается 176 [1].

За эти же полвека космическая деятельность стала неотъемлемой частью мировой экономики, социального развития, систем безопасности, научных исследований. Действует глобальная коммерческая индустрия с годовым доходом около 300 млрд долларов. Зарегистрированы миллионы пользователей космическими услугами из 110 стран мира. В проекте МКС участвуют 16 государств с бюджетом более 100 млрд долларов, а собственные спутники в 2010 г. имели более 60 стран.

И за эти же полвека появилась мощная неуправляемая группировка техногенного космического мусора (КМ), которая представляет опасность для экологической безопасности (сохранности) природы околоземного космического пространства, для функционирования научных, гражданских и военных КА. Случайное столкновение фрагмента КМ с действующим военным КА любого государства может спровоцировать военный конфликт, а это уже серьезное военнополитическое последствие техногенного засорения космоса.

Нормативно-правовые документы по проблеме космического мусора

Хотя вопросы загрязнения околоземного пространства поднимались на международном уровне уже в 60-х гг., официальный статус проблема космического мусора получила 10 декабря 1993 г. после доклада Генерального секретаря ООН «Воздействие космической деятельности на окружающую среду». В докладе было отмечено, что проблема космического мусора не сводится к проблемам государств — участников космической деятельности, а имеет международный, глобальный характер.

Основополагающим международным правовым документом, в котором впервые нашли отражение вопросы, связанные с противодействием загрязнению околоземного космического пространства, явился Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела (1967). В Договоре впервые были закреплены принципы международного космического права, в том числе принцип охраны окружающей среды, обязывающий государства избегать загрязнения космоса [2].

В 1993 г. официально оформился международный орган, единственной задачей которого стало всестороннее изучение проблемы техногенного засорения ОКП и выработка мер противодействия этому процессу, — Международный координационный комитет по проблеме техногенного засорения космического пространства — Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC). Организаторами комитета стали четыре космических агентства: НАСА, РКА, ЕКА и японское НАСДА. Сейчас в него входят космические агентства 12 стран.

С 2001 г. этот Комитет является полномочным консультативным органом Комитета ООН по мирному использованию космического пространства (UN COPUOS) по всем техническим аспектам проблемы КМ. Комитет регулярно представляет в ООН технические отчеты о текущем состоянии засоренности ОКП и предложения по снижению ее темпов. На основе этих отчетов ООН выпускает свои рекомендации по использованию ОКП.

Перед учеными и руководителями работ, занимающимися космической деятельностью, поставлено несколько основных задач:

- обнаружение космического мусора, изучение его происхождения, физико-химического состава, параметров движения, степени его опасности для космических аппаратов и при падении на поверхность Земли;
- разработка способов и аппаратурных комплексов для очистки околоземного космического пространства от опасного мусора;
- разработка рекомендаций и регламентов конструирования новых космических аппаратов и космических станций, не допускающих дальнейшего техногенного засорения околоземного космического пространства;
- разработка способов и средств защиты космических аппаратов от воздействия космического мусора.

В настоящее время эти вопросы интенсивно рассматриваются как на национальных уровнях, так и на уровне ООН. Наиболее важными направлениями изучения этих проблем являются:

- выявление и анализ опасных ситуаций, возникающих со стороны объектов космического мусора для функционирующих космических аппаратов, в том числе пилотируемых;
- анализ состояния и контроля использования геостационарной орбиты, являющейся ограниченным природным ресурсом, доступ к которому чрезвычайно важен для обеспечения связи, телевидения, метеонаблюдений;
- долгосрочный анализ динамики популяции космического мусора, включая малоразмерную фракцию;
- анализ космической деятельности в условиях возрастания практического использования малоразмерных космических аппаратов и технологий скрытного проведения операций в ОКП;

- анализ последствий применения малозаметных микроспутниковых систем.

В настоящее время разрабатываются нормативно-правовые документы, направленные на международную стандартизацию ракетно-космической техники с учетом требований по безопасности, совершенствование технологий наблюдения за космическим мусором, выработку согласованного порядка сбора и распространения данных о космическом мусоре, разработку стандартов на ограничение образования космического мусора как на этапе конструирования космических систем, так и на этапе их эксплуатации.

Одним из первых реальных достижений в деле борьбы с космическим мусором стала выработка новых международных стандартов в отношении искусственных спутников Земли. Теперь на их борту должны присутствовать резервные запасы топлива, чтобы по истечении срока работы увести аппараты в специально отведенные районы околоземных орбит или направить к Земле.

На 44-й сессии Научно-технического подкомитета Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях в 2007 г. был рекомендован к утверждению проект документа «Руководящие принципы по предупреждению образования космического мусора», принятый затем 62-й сессией Генеральной Ассамблеи ООН.

В этом документе определены и нормативно закреплены принципы:

- по ограничению образования космического мусора при штатных операциях, проводимых в космосе (полное исключение попадания в космическое пространство каких-либо конструктивных элементов, деталей, осколков, а также исключение выброса операционных элементов в конструкциях разрабатываемых космических аппаратов);
- по сведению к минимуму возможности разрушений в ходе полетных операций (выбор обоснованного запаса прочности конструктивных составляющих космических аппаратов; установка метеорной защиты на агрегаты высокого давления с целью предотвращения их пробоя и самопроизвольного разрушения; замена на космических аппаратах батарей на основе

серебряно-кадмиевых аккумуляторов, которые способны разрушаться в результате взрыва вырабатываемых ими газов, на никель-водородные батареи, а также другие мероприятия);

- по уменьшению вероятности случайного столкновения на орбите (обеспечение гарантированного увода космических объектов от возможных столкновений за счет выполнения необходимых маневров);
- по исключению преднамеренного разрушения;
- по минимизации возможности разрушений после выполнения программы полета, вызываемых запасом энергии (сброс давления в топливных емкостях, удаление (выжигание) остатков топлива из двигательных установок, разрядка бортовых аккумуляторных батарей, прекращение вращения маховиков, гироскопов и других механических устройств);
- по ограничению длительности существования космических аппаратов и орбитальных ступеней ракет-носителей в районе низких околоземных орбит после завершения их программы полета (увод космического аппарата с орбиты с последующим торможением и сгоранием в атмосфере);
- по ограничению длительного нахождения космических аппаратов и орбитальных ступеней ракет-носителей на геостационарной орбите после завершения ими программы работы (увод в зоны захоронения).

В этих же целях подготовлены предложения по созданию под эгидой ООН международной платформы данных об объектах в космическом пространстве. Такая база данных должна быть доступна всем государствам—членам ООН.

Поскольку космос постепенно превращается в зону вложения капитала, а коммерсантов всегда интересовали вопросы страхования рисков и возмещения потерь в результате тех или иных форс-мажорных обстоятельств, этот фактор определил существенные подвижки в формировании нормативной базы в сфере ограничения техногенного засорения околоземного космического пространства и повышения безопасности космических полетов в рамках действующих национальных законодательств ведущих космических стран мира.

В Китае разработка стандартов для уменьшения количества космического мусора была начата в период 10-й пятилетки (2001—2005). В июле 2005 г. там были официально опубликованы космические отраслевые стандарты QJ3221 «Требования к снижению количества космического мусора». В 2006 г. разработаны системы критериев космического мусора. Китайской национальной космической администрацией (КНКА) разработан План по борьбе с космическим мусором (2006—2010).

В Японии Национальное агентство по космическим разработкам (НАСДА) в 1996 г. установило стандарт на ограничение образования космического мусора (NASDA STD-18), который применяется по отношению к космическим системам НАСДА как на этапе их конструирования, так и на этапе их эксплуатации.

В Российской Федерации в 2005 г. введен в действие Национальный стандарт Российской Федерации (ГОСТ Р 25645.167-2005), устанавливающий модель распределения космического мусора. В 2007 г. утверждена его окончательная редакция (ГОСТ Р 52925-2008) под названием «Изделия космической техники — Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства».

Действующая нормативно-правовая база в сфере борьбы с космическим мусором направлена на профилактику процессов, связанных с его возникновением. Но проблемы активной борьбы с уже накопленным космическим мусором, его уничтожением, сбором, снятием с орбиты и пр. пока должным образом не урегулированы.

Оценка характеристик космического мусора

С самого начала космической эры космическими державами было осуществлено свыше 5 000 запусков, в результате чего в ОКП оказалось порядка 30 000 крупных (размером более 10 см) космических объектов (КО). За весь период освоения космоса зарегистрировано около 34 000 объектов. Из них более двух третей все еще остаются на орбитах и контролируются наземными и космическими средствами наблюдения.

В настоящее время на околоземных орбитах обычными (штатными) средствами наблюдения контролируются около 20 000 космических объектов, из которых каталогизировано ~ 17 500 (каталог СККП США). Эти КО имеют размер более 10 см. Из них размер бо-

лее 1 м имеют около 4 500 объектов (модель MASTER-2001, ЕКА). Кроме того, в США ведется каталог, содержащий более 100 000 КО, в который входят и более мелкие объекты.

Сейчас функционируют немногим более 800 космических аппаратов, что составляет менее 5 % от общего количества каталогизированных космических объектов. Остальные 95 % — это крупный космический мусор массой от 300 г до 20 т. Суммарная масса КМ этого класса превышает 10 000 т [3].

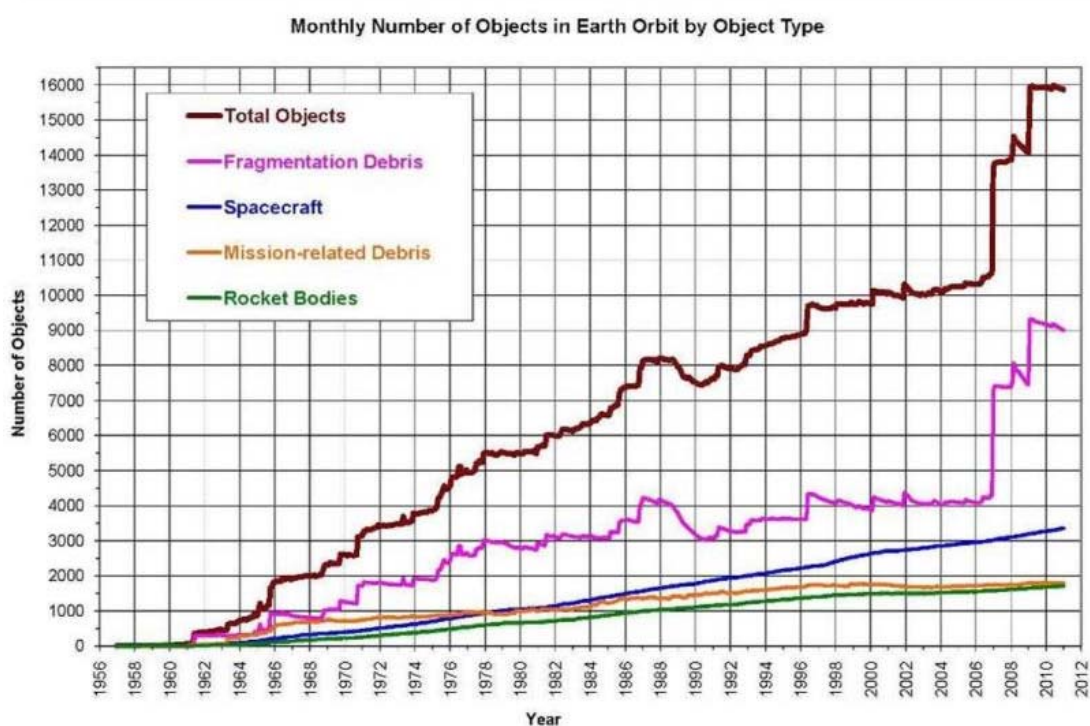
Кроме этих, каталогизированных и регулярно наблюдаемых КО в ОКП находится огромное количество мелких (но от этого не менее опасных), как правило не видимых радиолокационными и оптическими средствами, частиц. По данным модели MASTER-2001, ЕКА, существует порядка 600 000 КО размером 1—10 см и десятки миллионов частиц размером 0.1—1 см. Количество более мелких частиц в ОКП исчисляется уже миллиардами и триллионами.

Результаты исследований специалистов России, США, Франции, Германии, Японии, приведенные в отчетах IADC, указывают на прогрессирующий характер процесса засорения космоса. Анализ распределения плотности объектов в ОКП показывает, что наиболее проблемными областями являются орбиты, которые наиболее интенсивно используются для размещения функциональных космических аппаратов: орбиты с высотой 800, 1 000, 1 400—1 500 км, область геостационарной орбиты (ГСО). Особо выделяется также область пилотируемой космонавтики — орбиты с высотой 350—400 км.

К космическому мусору относятся все нефункционирующие спутники, ступени ракет и их обломки, мусорные баки и детали конструкций (отстреливание контейнеров с мусором с пилотируемых КА прекратили в 1995 г., но несколько сотен таких контейнеров все еще в космосе), фрагменты взрывов (их было около 200) и разрушений. Наибольший вклад в создание группировки космического мусора внесли СССР-РФ, США и Китай. По 1—3 % добавили Франция, ЕКА, Япония, Индия.

Изменение состояния техногенной засоренности ОКП с начала космической эры до настоящего времени (в части крупных, каталогизированных КО) иллюстрируется рисунком. Диаграмма построена по данным каталога КО СККП США на январь 2011 г. Резкий скачок в количестве обнаруженных и каталогизированных КО, приходящийся на 2007 г., вызван испытанием противоспутникового оружия Китайской Народной Республикой. Кривая 1 (сверху) представляет общее количество КО в каталоге; кривая 2 — количество

фрагментов в результате взрывов и других разрушений; кривая 3 — количество КА (как действующих, так и неисправных); кривая 4 — КМ, сопутствующий запускам и функционированию КА и КК; кривая 5 — количество ракет-носителей.



Изменение состояния техногенной засоренности ОКП с самого начала космической эры до настоящего времени

Уменьшение количества КМ на орбитах возможно в случае естественного схода КО с орбиты в результате торможения в верхней атмосфере либо увода с орбиты с помощью специальных маневров или с использованием аэродинамического торможения.

Ежегодный прирост объектов КМ в ОКП размером более 20 см — 600—700.

Анализ опасных ситуаций, создаваемых космическим мусором в космосе и на Земле

Опасность, вызванную наличием космического мусора на орбитах, трудно переоценить.

Можно выделить следующие опасные ситуации в ОКП, связанные с мусором:

- столкновения действующих КА с КМ и вывод их из строя;
- опасность для экипажа пилотируемых КА при столкновении с КМ;
- нанесение ущерба на Земле при неконтролируемом падении крупногабаритного космического мусора.

Главной опасностью со стороны КМ является перспектива развития каскадного эффекта (синдрома Кесслера) — стремительно расширяющегося цепного процесса образования вторичных осколков КО в результате все возрастающего числа столкновений КО вследствие чрезмерного повышения плотности КМ в ОКП. В этой трагической фазе процесса засорение космического пространства КМ приобретает уже некий агрессивный характер. Каскадный эффект приведет к практической невозможности использования ОКП в научных, исследовательских, хозяйственных, коммерческих, военных и других целях.

По мнению авторитетных специалистов в этой области, каскадный эффект уже начался в части мелкой фракции КМ.

Характерная черта проблемы засорения ОКП — постоянное увеличение вероятности столкновений КО и катастрофичность столкновения даже с небольшим КО из-за гигантской относительной скорости КО во время столкновения.

Высокая вероятность столкновения функционирующих КА с элементами КМ вынуждает конструкторов прибегать к весьма дорогостоящей защите — бронированию оболочки КА — и выводить в космос значительно большую массу, чем необходимо для выполнения основной задачи КА, причем эта дополнительная масса сама в конце концов становится вкладом в КМ.

Вероятность столкновения с мелким КМ (< 1 мм) сейчас практически равна 1. Эта оценка подтверждается апостериорным анализом оболочек возвращенных на Землю КА (Palapa, Euresca, LDEF, Solarwind и многих других). После нескольких лет пребывания в космосе они оказались испещренными множеством каверн и царапин, оставленных крошечными частицами. Космическая платформа LDEF просуществовала на околоземной орбите более 5 лет, исследуя последствия столкновений мелкой фракции КМ с конструкционными материалами [4].

Американские шаттлы неоднократно подвергались ударам КМ. В первых 33 полетах постоянно повреждалось черепичное абляционное покрытие. Восемь раз шаттлам приходилось совершать маневры уклонения от встречи с КМ. В среднем после каждых двух полетов приходилось заменять иллюминаторы (их 18) ввиду серьезных повреждений мелким КМ. В целом мелкий КМ заметно сокращает срок службы КА.

Для парирования этой угрозы применяют усиление конструктивных обшивок, чтобы не допустить пробития и разрушения аппаратуры КА. Опасность мелкой фракции КМ состоит не столько в массе частиц (которая из-за ничтожных размеров мала), сколько в огромном их количестве, широком распространении во всем ОКП и высокой относительной скорости движения в момент соударения. На низких орбитах она может достигать 14 км/с и более.

Что же касается крупного КМ, то здесь фактически нет способов защиты, за исключением защитного маневрирования, чтобы избежать столкновения. Маневры уклонения известны. Например, лишь в 2009 г. только КА, контролируемым НАСА, пришлось совершить 9 маневров:

- 27 января TDRS-3 уклонился от РН «Протон»;
- 22 марта МКС уклонилась от обломков РН «CZ-4»;
- 23 апреля CLOUDSAT уклонился от обломков КА «Космос-2251»;
- 1 мая «ЕО-1» уклонился от обломков РН «Зенит»;
- 17 июля МКС уклонилась от обломков РН «Протон»;
- 10 сентября Спейс Шаттл уклонился от КМ с МКС;
- 29 сентября Parasol (Франция) уклонился от обломков КА «Фенгюн»;
- 25 ноября Aqua уклонился от обломков КА «Фенгюн-1С»;
- 11 декабря Landsat-7 уклонился от «Формсат-3Д».

Известны многочисленные факты столкновений в космосе. Однако столкновений крупных объектов зафиксировано немного. Впервые столкновение, приведшее к уничтожению дорогостоящего действующего КА, произошло 24 июня 1996 г., когда военный КА радиоэлектронной разведки Франции CERISE столкнулся с обломком РН Ariane и перестал функционировать.

10 февраля 2009 г. КА обеспечения глобальной спутниковой связью объектов США «Иридиум 33» столкнулся с нефункционирующим российским ИСЗ «Космос-2251» с образованием большого числа обломков.

Это был первый случай столкновения двух искусственных спутников в космосе. Столкновение произошло над территорией Российской Федерации (над полуостровом Таймыр, над точкой 72.5° с. ш., 97.4° в. д.) на высоте 789 км.

Скорости обоих спутников были приблизительно равны и составляли около 7470 м/с, а с учетом того, что траектория движения была практически перпендикулярной, относительная скорость была равна почти 10500 м/с. ИСЗ «Космос-2251», принадлежавший Космическим войскам России, был выведен на орбиту в 1993 г. и функционировал до 1995 г. Iridium 33, один из 72 спутников оператора спутниковой телефонной связи «Иридиум», был запущен на орбиту в 1997 г. В результате столкновения оба спутника разрушились полностью. Масса американского спутника Иридиум составляла 600 кг, а российского аппарата «Космос-2251» — 1 т. В результате столкновения образовалось около 600 обломков.

Последствия техногенного засорения ОКП ярко проявились при функционировании Международной космической станции (МКС). Только в 2008 г. было зафиксировано 246 опасных сближений МКС с элементами КМ, в том числе 41 — в так называемой «красной зоне» (крайне опасных). МКС вынуждена совершать маневры ухода от столкновений с КМ в среднем 1 раз в год. До сих пор МКС удавалось уходить от столкновений, совершая маневр уклонения. Кроме того, невозможно предсказать сближение с малоразмерными, некаталогизированными КО, которые также крайне опасны для МКС.

Падения на Землю крупных фрагментов КО после их вхождения в плотные слои атмосферы происходили многократно и вызывали большой общественный резонанс. Достаточно вспомнить такие напугавшие случаи, как падение на Землю обломков ИСЗ «Космос-954» с радиоактивными материалами на борту (на территорию Канады) в 1978 г., американской космической лаборатории «Скайлэб» в 1979 г., ИСЗ «Космос-1402» (с бортовым ядерным реактором) в 1983 г., орбитального комплекса «Салют 7» — «Космос-1686» в 1991 г., транспортного корабля «Прогресс М-17» в 1994 г., ИСЗ «Космос-389» в 1995 г., китайской спускаемой капсулы FSW-1-5, российского межпланетного корабля «Марс-96» в 1996 г. и др.

Обзор современных зарубежных средств мониторинга космического мусора

Контроль мусора в околоземном космическом пространстве осуществляют средства контроля космического пространства. Наиболее развитой системой контроля мусора обладает NASA во взаимодействии с Министерством обороны США.

Средства контроля осуществляют сбор координатной и некоординатной информации в радиолокационном и оптическом диапазонах длин волн. Эта информация позволяет решать задачи сопровождения, идентификации, распознавания и оценки состояния действующих космических аппаратов и космического мусора.

Радиолокационные информационные средства

Основная доля потока информации по космическому мусору обеспечивается радиолокационными средствами дежурного режима. К таким РЛС относятся:

- РЛС с ФАР AN/FPS-85,
- РЛС с ФАР PARCS,
- РЛС с ФАР AN/FPS-108 COBRA DANE.

РЛС с ФАР AN/FPS-85

Радиолокационная станция AN/FPS-85 является единственной специализированной РЛС с фазированной антенной Р, созданной для наблюдения космического пространства. Она введена в строй в 1969 г. РЛС расположена на авиабазе Эглин, Северная Флорида, с координатами 30.72° с. ш., 273.79° в. д. С 1974 по 1987 г. основным назначением РЛС являлось слежение за пусками советских БРПЛ с южного направления с целью предупреждения о ракетно-ядерном ударе.

За время эксплуатации РЛС неоднократно подвергалась модернизации, в частности, в 1987 г. на РЛС был реализован режим наблюдения высокоэллиптических и геостационарных КО. В 1999 г. на командном центре РЛС была проведена замена вычислительных средств и управляющей боевой программы с целью реализации режима контроля малоразмерной фракции космического мусора.

РЛС работает на частотах 437—447 МГц (основная 442 МГц) и обеспечивает сопровождение КО в областях ближнего и дальнего

космоса и, в частности, КО с малым наклоном орбит и КО на стадии перехода на геостационарные орбиты. Станция ориентирована по азимуту строго на юг (180°), при этом зона действия по азимуту изменяется от 120° до 240° , а по углу места от 3° до 105° . Наклон антенного полотна — 45° от линии местной вертикали.

Дальность действия РЛС 40 000 км. Темп зондирования — 50 мс. Длительность импульса — 250 нс. Мощность излучаемого сигнала — до 32 МВт.

Конструктивно РЛС выполнена в виде бистатического локатора с разнесенными приемной и передающей антенной. Пропускная способность РЛС AN/FPS-85 — 200 КО одновременно. Станция обеспечивает поток более чем 10 000 наблюдений в сутки. РЛС контролирует 2/3 каталогизированных КО.

РЛС с ФАР AN/FPS-108 Cobra Dane

На Алеутских островах (штат Аляска) развернута РЛС AN/FPS-108 Cobra Dane. РЛС предназначена для сбора технической радиолокационной разведывательной информации о запусках межконтинентальных баллистических ракет и запусках ракет с подводных лодок в интересах испытаний в районах Камчатского полуострова и Тихого океана.

РЛС AN/FPS-108 представляет собой радар с односторонней ФАР с дальностью действия порядка 5 000 км. Размер антенного полотна 30 м. Станция ориентирована в направлении 319° с зоной контроля по азимуту, равной $\pm 60^\circ$.

РЛС AN/FPS-108 Cobra Dane является основным наземным средством обнаружения запусков иностранных КА. С учетом расположения это первая радиолокационная станция США, обнаруживающая и сопровождающая КА, запускаемые с полигонов Российской Федерации с наклонами, большими 53° .

РЛС Cobra Dane в 1993 г. подверглась модернизации для повышения возможностей аппаратуры и программного обеспечения. РЛС обеспечивает одновременное наблюдение до 200 КО.

РЛС с ФАР AN/FPQ-16 (Perimeter Acquisition Radar Attack Characterization System — PARCS)

РЛС с ФАР AN/FPQ-16, стоящая на вооружении радиолокационного поста PAR (Perimeter Acquisition Radar), была спроектирована в рамках создания системы противоракетной обороны США Safeguard

AntiBallistic Missile system как средство дальнего обнаружения боеголовок МБР и БРПЛ, атакующих территорию США со стороны Северного полюса.

Дальность действия РЛС — 3 300 км. Ориентация антенны по азимуту — 8° . Размер зоны действия по азимуту — 140° ($298-0-78^\circ$). Границы секторов обзора по углу места $2-45^\circ$. Пропускная способность РЛС — 200 объектов. Общий поток — более 20 000 измерений в сутки.

Радиолокационные средства испытательного полигона им. Рейгана

На испытательном полигоне им. Рейгана на атолле Кваджалейн в западной части Тихого океана расположены РЛС ALCOR и ALTAIR, привлекаемые к контролю космического мусора.

РЛС ALCOR (ARPA-Lincoln C-band Observables Radar)

РЛС ALCOR с диаметром антенны 12.2 м предназначена для точного измерения параметров движения баллистических ракет, их головных частей и боеголовок, а также распознавания космических объектов. РЛС обеспечивает одновременное сопровождение по угловым координатам одной, а по дальности — двух целей. Радар имеет функцию получения широкополосных изображений при частоте 5 664—5 672 МГц. Широкополосная форма волны обеспечивает разрешение по дальности приблизительно 0.5 м. Форма волны, состоящей из двух близкорасположенных широкополосных импульсов, допускает измерение скорости цели. Дальность действия РЛС 4 500 км.

Для построения двумерных изображений ИСЗ и БЦ, входящих в плотные слои атмосферы, в станции используются когерентные измерения дальности (точность около 1 м) и углов (точность до 0.0046°), что позволяет определять размеры, форму, конфигурацию и ориентацию космических объектов, а также проводить селекцию и оценку угроз.

РЛС ALTAIR (ARPA Long-range Tracking and Instrumentation Radar)

РЛС ALTAIR с диаметром антенны 45.7 м предназначена для дальнего обнаружения и сопровождения баллистических ракет, головных частей и боеголовок, определения их координат мест паде-

ния, выдачи целеуказаний по ним другим информационным средствам полигона, а также для контроля космического пространства в составе «тихоокеанского барьера обнаружения» системы ККП ВВС С.

Высокая чувствительность и относительно большая ширина луча радиолокационной станции обеспечивает работу по рассредоточенным целям. Она обеспечивает обнаружение боеголовок с ЭПР 0.3 м^2 на дальностях около 4 тыс. км с одновременным сопровождением до 32 (в перспективе до 100) целей. За счет одновременного измерения дальности до цели на двух частотах (332 и 155.5 МГц) она позволяет также осуществлять постоянную корректировку коэффициентов ионосферной рефракции. Эти же качества обеспечивают слежение РЛС за космическими объектами, находящимися на орбитах вплоть до геостационарных.

Служба USSPACECOM использует эту радиолокационную станцию для слежения за ВОКО и НОКО около 128 ч в неделю. Из-за ее близости к экватору эта РЛС обеспечивает контроль трети геостационарной дуги.

Комплекс наблюдения космического пространства лаборатории им. Линкольна, Миллстоун (Millstone)

Комплекс РЛС включает:

- РЛС Millstone Hill,
- РЛС Haystack,
- РЛС Haystack Auxiliary (НАХ).

РЛС MHR (Millstone Hill Radar)

РЛС MHR представляет собой РЛС сопровождения ИСЗ (Satellite Tracking Radar) с диаметром антенны 26 м. РЛС может обнаруживать на дальности 35 000 км КО с ЭПР 1 м^2 . Станция является первой РЛС в мире, с помощью которой наблюдали полет первого спутника в 1957 г. Высокая мощность излучения этой РЛС позволяет осуществлять контроль геостационарной области с наблюдением КА, ступеней РН и фрагментов запуска. Она выдает высокоточные траекторные данные о КО и позволяет прогнозировать возникновение опасных ситуаций на геостационарной орбите.

РЛС MHR заключает с командованием ВВС США контракт на работы в течение приблизительно 80 ч в неделю.

Радиолокационный комплекс Haystack

РЛС Haystack-LRIR имеет подвижную антенную систему типа Кассегрена с диаметром основного отражателя 36.6 м, закрытую радиопрозрачным куполом. Сектор обзора в азимутальной плоскости круговой, в угломестной от -2 до $+92^\circ$. При работе на частоте 39 ГГц станция может получать радиолокационные портреты целей на высотах до 16 тыс. км.

Радиолокационная станция Haystack обеспечивает при получении изображений КО разрешающую способность по дальности 25 см при максимальном размере объекта 120 м. Эта точность не зависит от дальности, поэтому изображения КО могут быть с одинаковым качеством получены как на дальностях 200—4 000 км, так и на дальности порядка 40 000 км. Сопровождение НОКО ограничивают доступные скорости перемещения антенны до $2^\circ/\text{с}$, возможности наблюдения ВОКО ограничиваются обнаружительной способностью 1 м^2 на дальности 40 000 км. Изображения представляются в виде диаграммы дальность — поперечный размер в масштабе времени, близком к реальному.

РЛС является единственной широкополосной станцией в западном полушарии, способной получать изображения КО. С этой целью РЛС Haystack выполняет восемь запланированных пятидневных сеансов и два выборочных сеанса в год. В одном сеансе однократно или многократно сопровождается 40—60 КО. Для организации выборочного сеанса требуется от 4 до 8 ч на перестройку оборудования.

Оптические средства контроля космического мусора

Преимущество при использовании оптического телескопа для контроля космического пространства состоит в том, что можно легко обнаружить объекты космического мусора на высоких орбитах, включая геостационарные.

В настоящее время исследование космического мусора продолжается с использованием телескопов MODEST, MCAT и NASS.

Телескоп MCAT (Meter-Class Autonomous Telescop)

Телескоп MCAT расположен на небольшом острове атолла Квад-желейн. Телескоп, оснащенный матрицей размерностью 4К, исполь-

зуется для контроля мусора по следующему сценарию. В течение сумерек телескоп контролирует низкие орбиты в режиме пролета или сопровождения. В середине ночи производится поиск объектов на геостационарных орбитах. Атолл Кваджалейн был выбран в качестве размещения МСАТ потому, что:

- его местоположение позволяет контролировать низкие орбиты и малые наклонения;
- его местоположение позволяет контролировать часть геостационарной области, не контролируемой другими оптическими датчиками;
- телескоп может быть использован совместно с РЛС, расположенной на атолле;
- на атолле имеется квалифицированный персонал для эксплуатации сложных установок.

Телескоп может обнаруживать и сопровождать частицы космического мусора диаметром до 1 см на низких и до 10 см на геостационарных орбитах.

Телескоп MODEST(Cerro Tolol, Чили)

Для наблюдения за мусором на ГСО в течение года используется телескоп Мичиганского университета, расположенный в Cerro Tololo в Чили (высота 2 200 м). Система носит название MODEST (Michigan Orbital DEbris Survey Telescope). Характеристики телескопа: апертура 0.61 м; фокусное расстояние определяется выражением $f = D \cdot 3.5$; схема Шмидта. Поле зрения $1.3 \times 1.3^\circ$; стандартное время накопления 5 с для объекта 18-й звездной величины.

Телескоп с жидким зеркалом LMT

Телескоп LMT был создан для НАСА и расположен в Клаудкрофте, Нью-Мексико, с целью измерения популяции малых орбитальных элементов космического мусора. LMT включает в себя чашу диаметром 3 м, которая содержит 4 галлона жидкой ртути и вращается вокруг вертикальной оси со скоростью 10 об/мин. Центробежная сила и сила тяжести распределяют ртуть тонким слоем по стенкам чаши, создавая параболическую поверхность, оптическое качество которой соответствует полированному стеклянному зеркалу, а фокусное расстояние определяется выражением $f = 1.5 \cdot D$.

Чтобы обеспечить необходимую стабильность, зеркало установлено на прецизионном воздушном подшипнике. Телескоп способен наблюдать ЭКМ и небесные тела, попадающие в вертикально направленное поле зрения размером 0.26° . Телескоп, в котором использованы ПЗС с обратной засветкой, обнаруживал низкоорбитальные объекты размером более 1 см, имеющие блеск до 24-й звездной величины.

Обзор способов борьбы с космическим мусором

Для решения проблемы борьбы с космическим мусором международным научным сообществом решаются две основные задачи: первая — снижение техногенной засоренности околоземного пространства и вторая — обеспечение защиты космических аппаратов от воздействия космического мусора.

Задача снижения засоренности околоземного космического пространства решается путем ограничения роста объемов космического мусора и непосредственной очистки околоземного космического пространства от космического мусора.

Ограничение роста объемов космического мусора в околоземном космическом пространстве

Одним из первых реальных достижений в деле борьбы с распространением космического мусора стала выработка новых международных стандартов в отношении искусственных спутников Земли: закреплено требование обязательного увода космического мусора на так называемые орбиты утилизации, где он либо сгорит в атмосфере, либо окажется в нерабочей зоне. Теперь на борту космических аппаратов должны присутствовать резервные запасы топлива, чтобы по истечении срока работы увести аппараты в специально отведенные районы околоземных орбит или направить их к Земле. Предусматривается также оснащать спутники дополнительными системами управления, способными в случае поражения аппарата частицами мусора уводить их с рабочих орбит. Предполагается, что «кладбища спутников» будут располагаться на 200—400 км выше зоны геостационарных орбит.

Другое важное требование — оснащать разгонные блоки ракет системами слива топлива. Оказавшись в космосе, после завершения маневра управляющая электроника в обязательном порядке должна

открыть клапаны и выбросить излишки горючего. К сожалению, и этого порой недостаточно. Из-за особенностей топлива и невозможности полностью выбросить его из резервуаров взрываются даже «опустошенные» баки. А значит, должны быть предприняты меры по совершенствованию конструкции космических ракет.

Эффективной мерой предотвращения взрывов космических аппаратов в околоземном космическом пространстве является пассивация (выброс энергии) аппаратов в конце программы полета. К эффективным мерам пассивации можно отнести сжигание или продувание неиспользованного топлива, разрядку аккумуляторных батарей, освобождение жидкостей из-под давления и др.

Еще одной проблемой, связанной с ограничением роста космического мусора, является проблема утилизации отходов космической деятельности. В настоящее время этой проблеме посвящены несколько международных исследовательских проектов. Один из них — решение проблемы утилизации органических отходов жизнедеятельности экипажа во время космического путешествия. Лучшим вариантом, по мнению ученых, является утилизация бытовых отходов при помощи особых бактерий, а самым экологически безопасным и эффективным способом — расщепление отходов микроорганизмами.

Очистка околоземного космического пространства от космического мусора

Проектов существует множество: использование многоразовых орбитальных кораблей типа «Буран» и «Шаттл» в качестве перспективных средств поиска и захвата пассивных космических объектов, создание межорбитальных буксиров, оснащенных роботами-манипуляторами, мусоросборщиков и т. п. Наибольшую известность получили следующие способы очистки околоземного космического пространства.

Перевод мелкого космического мусора (до 10 см) на более низкие орбиты с использованием вольфрамовых пылевых частиц

Такой способ предложен американскими учеными лаборатории ВМС США для удаления космического мусора небольших размеров (до 10 см).

Время жизни космического мусора растет вместе с так называемым баллистическим коэффициентом B , определяемым как отно-

шение массы к площади. Частицы с $B = 3\text{--}5 \text{ кг/м}^2$ скапливаются на высоте около 1 000 км и могут находиться там веками. Если они опускаются ниже 900 км, где сопротивление среды возрастает, максимальное время их жизни — до 25 лет. Задача сводится к тому, чтобы уменьшить высоту орбиты обломков до 900 км и дожидаться того момента, когда они будут уничтожены естественным путем. Проблема имеет вполне очевидный способ решения: нужно увеличить сопротивление движению этих частиц. По расчетам исследователей, для перевода небольших обломков с орбиты высотой 1 100 км на 900 км понадобится слой 30-микрометровой вольфрамовой пыли толщиной в 30 км и общей массой «всего» в 20 т. Процесс искусственного снижения мусора при этом растянется на 10 лет.

Уничтожение космического мусора с помощью наземного лазера «лазерная метла»

Специалистами НАСА предложено корректировать траекторию движения не космического аппарата, а самого мусора, оказав воздействие на него лучом наземного лазера.

При нагреве частицы мусора лазерным лучом испаряется микрослой материала и создается реактивная сила. С ее помощью можно снизить высоту орбиты частицы мусора до 200 км. На этой высоте трение об атмосферу настолько велико, что космический мусор будет уничтожен за несколько часов.

Специалисты ВВС США рассчитали, что лазерная установка, размещенная на экваторе, сможет очистить космос на высоту до 800 км за два года. Ученые НАСА в настоящее время активно работают над «лазерной метлой», защищающей МКС от частиц космического мусора диаметром от 1 до 10 см. Как уже говорилось, сегодня обшивка МКС способна выдержать удар мусора диаметром менее 1 см, а станции наблюдения на поверхности Земли могут предупредить космонавтов об опасности столкновения с мусором крупнее 10 см. Все, что между этими двумя цифрами, представляет смертельную опасность для обитателей станции. И как раз лазер, по словам специалистов, должен закрыть эту брешь в защите, автоматически наведясь на цель, разогреть частицу мусора и увести ее с орбиты станции.

Преимущество «лазерной метлы» — в возможности создания активной системы защиты космических аппаратов и высокой эффективности работы по очистке космоса с поверхности Земли.

Сбор космического мусора с помощью космического тральщика

Оборонное агентство DARPA работает над проектом большой электродинамической сети EDDE, которая будет собирать на низкой околоземной орбите куски мусора тяжелее 2 кг.

По мнению разработчиков, за 7 лет 12 аппаратов EDDE должны полностью очистить околоземную орбиту от крупных кусков космического мусора. Первый полет аппарата EDDE запланирован на 2013 г., а разворачивание всей группы должно начаться в 2017 г.

Способ очистки мелкого мусора с помощью шара из аэрогеля

Специалист НАСА по космическому мусору Николас Джонсон (Nicholas Johnson) несколько лет назад активно продвигал идею использования для очистки орбиты огромного шара из аэрогеля. Аэрогель — чрезвычайно пористый материал, состоящий из пустоты на 99 %. Попадая в такое вещество, мельчайшие частицы заполняют пористую поверхность и оседают в пластине.

Использование «солнечного паруса» в качестве космического тормоза

Британские ученые работают над проектом CubeSail. Разрабатываются крошечные спутники, оборудованные «солнечным парусом». По завершении своей собственной миссии они должны найти ближайший обломок космического мусора, закрепиться на нем и использовать «солнечный парус» в качестве космического тормоза. После этого спутники CubeSail с прикрепленными к ним обломками космического мусора должны войти на большой скорости в верхние слои атмосферы Земли и сгореть.

На орбиту они будут доставлены в качестве дополнительного груза при выводе на орбиту других, более крупных космических аппаратов. «Солнечный парус» спутника CubeSail размером 5×5 м, согласно сделанным расчетам, сможет обеспечить силу, способную столкнуть с орбиты космический мусор любого размера.

Запуск первых опытных образцов спутников CubeSail планировался на конец 2011 г.

Использование робота-уборщика для возврата крупного космического мусора

Пресс-служба Японского аэрокосмического агентства (JAXA) сообщила о разработке очередной технологии по утилизации крупного космического мусора. В ее основе — использование робота-уборщика, который прочно захватывает рукой-манипулятором старый спутник или обломок ракеты и, уходя вниз, к Земле, сгорает вместе с ним в атмосфере. При весе около 140 кг аппарат будет способен тормозить обращение вокруг Земли предназначенного для уничтожения объекта с помощью мощного электромагнита. Для этого он оборудован электропроводящим канатом, который может разматываться на несколько километров. По подсчетам ведомства, строительство одного такого робота обойдется примерно в 400 млн иен (около 4 млн долларов США), передает ИТАР-ТАСС. Однако в JAXA рассчитывают, что в будущем спрос на их устройство будет неизбежно расти.

Пилотируемый корабль для уборки космического мусора

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» планирует использовать пилотируемый корабль нового поколения для ремонта спутников и очистки ОКП от крупного космического мусора.

Предлагается, в частности, обслуживать метеорологические спутники и аппараты дистанционного зондирования Земли.

Ремонт аппарата будет осуществляться во время выходов в открытый космос или с помощью роботизированных систем. Пилотируемый космический корабль нового поколения разрабатывается Ракетно-космической корпорацией «Энергия» и будет запускаться с нового космодрома Восточный в Амурской области.

Библиографические ссылки

1. Orbital Debris Quarterly News. — 2011. — Vol. 15, iss. 3.
2. *Верещетин В. С.* Международное сотрудничество в космосе: правовые вопросы. — М. : Наука, 1977.
3. *Вениаминов С. С., Червонов А. М.* Космический мусор — угроза человечеству. — М. : ИКИ РАН, 2012.
4. *Рыхлова Л. В., Бахтигараев Н. С.* Новые проблемы околоземной астрономии // Околоземная астрономия 2009. — М. : Ин-т астрономии РАН, 2010.

ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК

Рассматривается проблема происхождения и эволюции дисковых галактик — спиральных и линзовидных. Показано, что доминирующая сейчас концепция, предполагающая формирование линзовидных галактик из спиральных примерно 4—5 млрд лет назад, при аккреции на массивные группы и скопления в ходе иерархического скучивания гравитирующей материи, не согласуется с целым рядом наблюдательных фактов, в частности, противоречит старому возрасту звездных дисков современных линзовидных галактик. Предложена новая концепция, согласно которой все дисковые галактики формируются как линзовидные, на красных смещениях больше 1.5, и лишь позже, на $z < 1$, те из них, что не попали в плотное окружение и сохранили внешние резервуары холодного газа, превращаются в спиральные в результате аккреции внешнего газа в диски.

We consider a problem of formation and evolution of disk galaxies, both spirals and lenticulars. We show that the current paradigm suggesting S0 transformation from spirals about 4—5 Gyr ago during their accretion onto the assembling massive groups and clusters, contradicts to recent observational findings concerning in particular old ages of the large-scale stellar disks of nearby S0s. We propose instead a new scenario in the frame of which all disk galaxies formed as lenticulars at redshifts larger than 1.5, and only later those of them who avoided accretion into the dense environments and retained their reservoirs of cold gas, had become spirals due to smooth accretion of external cold gas into their disks.

Введение. Дисковые галактики

Согласно известной классификации Эдвина Хаббла [1] галактики бывают эллиптические (в форме сфероида, то есть «толстенские») и дисковые. Дисковые галактики состоят, в первом приближении, из двух компонент: сфероида (балджа) и диска. Отдельный вопрос,

который до сих пор дискуссионен: можно ли считать балджи эллиптическими галактиками, помещенными в центр дисков? Или у них есть принципиальные различия? Так или иначе, но балджи тоже сфероиды (то есть «толстенные» звездные структуры), а вот диски сплюснуты настолько, что во многих моделях их представляют двумерными структурами, совсем без толщины. Это, конечно, сильная идеализация, толщина у дисков есть, иногда и весьма заметная, но существенно, что радиус (или характерный масштаб вдоль радиуса) дисков значительно превышает их толщину (или характерный масштаб распределения звезд перпендикулярно плоскости диска).

Дисковые галактики, согласно Хабблу, бывают спиральные и линзовидные. Структура спиральных и линзовидных галактик очень похожа: и в том и в другом случае это диск+балдж; однако внешний вид очень различается: у спиральных галактик красивые спиральные рукава в дисках, многочисленные рассеянные по диску голубые области звездообразования, а у линзовидных галактик — скучный гладкий красноватый диск без особых деталей. Несмотря на сильное внешнее различие, многим исследователям приходило в голову, что спиральные и линзовидные галактики — близкие родственники. Действительно, если взять спиральную галактику и всего лишь «убрать» из ее диска газ, то:

- прекратится звездообразование в диске, а значит, исчезнут голубые кучки молодых звезд и диск станет выглядеть однородно красным;
- исчезнет «динамически холодная» компонента диска — газ и молодые звезды, а значит, динамически нагретый, толстоватый диск станет устойчив к гравитационным возмущениям и в нем больше не смогут развиваться спиральные волны плотности.

В результате всех этих перемен спиральная галактика превратится в линзовидную. Нужно только убрать газ из диска... Вот так в головах исследователей как-то сама собой зародилась эволюционная последовательность спиральные галактики → линзовидные галактики путем удаления газа из диска.

Существующая статистика по морфологическим типам галактик в разных местах Вселенной говорит о том, что в ближней Вселенной самый распространенный морфологический тип — спиральные галактики: их 72 %. Если разглядывать «поле», то есть области с достаточно неплотным расположением галактик, то там совсем мало эллиптических галактик, около 3 %, а линзовидных галактик — все-

го около 15 % [2]. Но чем в более плотные области мы углубляемся, тем больше там линзовидных галактик: в группах галактик их уже примерно столько же, сколько и спиральных — по 45 % тех и других, а в скоплениях галактик (куда, впрочем, входит всего 7 % галактик ближней Вселенной) линзовидные галактики уже составляют большинство — до 60 % галактик скоплений, это линзовидные галактики [3]. Значит, следующий логический шаг, который все сделали: вероятно, газ из дисков спиральных галактик уходит под действием внешних факторов — плотного окружения, и спиральные галактики превращаются в линзовидные, когда входят в плотное окружение. А когда они туда входят? Тут начинают радостно подсказывать космологи: ну как же, эволюция Вселенной — это иерархическое гравитационное сгущивание, галактики постепенно собираются во все более крупные коллективы, сначала в группы, потом — уже на подходе к современной эпохе, в последние миллиарды лет — в скопления. ... Вот тут все и случается!

Что думают ВСЕ про эволюцию дисковых галактик и почему это неправильно

Самое модное сейчас слово в эволюции дисковых галактик — quenching, резкое прекращение звездообразования. Где это происходит со спиральными галактиками? Это мы уже отметили: в плотных окружениях, в скоплениях и группах галактик. Когда? На этот вопрос уже тоже есть ответ, и даже ответ наблюдателей: на красном смещении 0.4—0.5, или 4—5 млрд лет назад. Дело в том, что, исследуя морфологический состав далеких скоплений галактик с Хаббловским космическим телескопом, команда Алана Дресслера [4, 5] смогла проследить в деталях так называемый эффект Батчера—Эмлера [6]: в далеких скоплениях, на $z = 0.4$ и дальше от нас, скопления населены в основном голубыми (спиральными?) галактиками, а ближе к нам, на $z < 0.4$, в богатых скоплениях доминируют уже красные линзовидные галактики. Поскольку этот момент — $z = 0.4$, или 4 млрд лет назад — по стандартной космологической модели соответствует началу массовой «сборки» скоплений галактик, то замена голубых галактик на красные истолковывается так: спиральные галактики поля аккрецируют на скопления под действием их мощной гравитации, а затем в плотном окружении лишаются газа, а вместе с ним и звездообразования. Как? И на этот счет теоретики дают исчерпывающий ответ.

Предложено не меньше десятка различных механизмов, с помощью которых можно удалить холодный газ из крупномасштабных дисков галактик [7–16]. Грубо говоря, все механизмы можно разделить на газодинамические и гравитационные. Как известно, в скоплениях галактик, а также во многих массивных группах есть межгалактический горячий газ. Чем массивнее группа или скопление, тем горячее газ; в самых богатых скоплениях его температура доходит до десятков миллионов Кельвинов, и виден он только в рентгене. Когда в это горячее газовое гало влетает на большой скорости дисковая галактика, заполненная холодным газом, происходит то же самое, что с вашими волосами, когда вы на скорости высовываетесь из окна едущей машины или поезда: ваши волосы сдувает назад; а холодный газ из дисков спиральных галактик и вовсе выдувает вон. По-английски этот эффект называют ram pressure, или лобовым давлением. Успешность его воздействия зависит от плотности межгалактической среды и от квадрата скорости движения галактики относительно этой среды; то есть этот эффект газодинамический. Есть еще и статический вариант с давлением межгалактической среды: даже если галактика будет покоиться относительно нее, давление горячего окружающего газа «подожмет» внутренний холодный газ галактик, простимулирует интенсивное звездообразование в нем, и газ просто в короткие сроки исчерпается на звездообразование. В обоих случаях крупномасштабный диск галактики лишается газа, и, следовательно, в нем прекращается звездообразование. До этого момента рассуждения безупречно логичны и подкреплены наблюдениями. Но дальше следует не столь логичный переход: раз звездообразование в диске прекращается, то спиральная галактика превращается в линзовидную. Это утверждение, вообще говоря, неверно. Действительно, мы видим в ближних скоплениях, например в Деве, спиральные галактики, обедненные нейтральным водородом — так называемые анемичные спирали. Но это именно спиральные галактики, хотя и с красными дисками. А то, что доля линзовидных галактик в скоплении не зависит от массы рентгеновского газа в нем, показал на большой выборке ближних скоплений еще Алан Дресслер в своей классической работе 1980 г. [3]. Значит, не воздействие рентгеновского газа превращает спиральные галактики в линзовидные.

Более популярны — и менее уязвимы для критики — предлагаемые гравитационные механизмы. Действительно, что означает «плотное окружение»? Оно означает наличие большого числа близких соседей — других галактик. Значит, в плотном окружении неиз-

бежна повышенная частота взаимодействия соседних галактик, в первую очередь взаимодействия гравитационного. Как показывают компьютерные симуляции (модели) гравитационного взаимодействия, практически все события такого рода приводят к уменьшению количества газа в крупномасштабном диске галактики и — вот это тоже очень важно! — к динамическому разогреву звездных дисков. Даже если соседняя галактика просто пролетела мимо, в столкновительной динамической системе с вязкостью, а именно таковы газовые диски галактик, развиваются разного рода приливные возмущения: увеличивается турбулентность газовых облаков, нарушается осевая симметрия центральных и внешних областей — возникают бары и приливные хвосты. Все эти структуры забирают момент у регулярно вращающихся газовых облаков, и мощные газовые потоки устремляются к центрам галактик. В результате внешние области диска лишаются газа, и там прекращается звездообразование, зато в центре газ накапливается и уплотняется, и там вспыхивает интенсивное и эффективное (то есть быстротекущее) звездообразование, за счет которого можно в короткие сроки нарастить балдж. Крупномасштабные звездные диски, лишенные газа и тоже турбулизованные («разогретье») приливами, становятся толстыми и устойчивыми против развития спиральных волн плотности. Все три трансформации — это как раз то, что необходимо для превращения спиральной галактики в линзовидную. Еще лучше все эти эффекты работают в случае малого мерджинга, то есть если соседняя галактика не просто пролетает мимо, а падает на «трансформируемый» объект. Тогда, если масса упавшей галактики не превышает 20 % от массы той, на которую она падает, мерджинг называется «малым»: диск не разрушается, как было бы при «большом» мерджинге, а греется, а газ просто сметается «спиралящим» (падающим по спирали) к центру спутником и увлекается им к центру галактики. Снова прекращается звездообразование в крупномасштабном диске и вспыхивает на короткое время в центре. Действительно ли эти красивые события в массовом порядке производят линзовидные галактики из спиральных на красном смещении 0.4—0.5?

Целый ряд наблюдательных работ, сравнивавших звездообразование и морфологию галактик в скоплениях на красных смещениях 0.4—0.7, поставил под сомнение простоту этого сценария: «морфологически спиральные» галактики в центральных областях скоплений могут быть как голубыми, так и красными, и, похоже (общий вывод этих работ), прекращение звездообразования в спиральных галак-

тиках в связи с их аккрецией на скопления не связано напрямую с морфологической трансформацией. Или связано, но не напрямую. Или вообще производится разными механизмами в разное время в разных местах. Таковы наблюдательные свидетельства.

Впрочем, насчет разных мест превращения спиральных галактик в линзовидные как раз общее мнение движется синхронно и довольно интенсивно: сейчас установилось общее мнение, что местом рождения линзовидных галактик являются не скопления, а группы галактик. Просто доля линзовидных галактик в скоплениях и группах на $z = 0.4\text{--}0.5$ оказалась одинаковой [17]; и общественное мнение пришло к выводу, что линзовидные галактики рождаются в группах, а потом вместо со своими группами аккрецируют на скопления как раз 4 млрд лет назад. А откуда же тогда в скоплениях берутся многочисленные голубые (спиральные?) галактики на $z = 0.5\text{--}0.7$? А они, вероятно, аккрецируют на скопления раньше, 5—6 млрд лет назад, и поодиночке, а не в составе групп. А потом? Превращаются в линзовидные галактики уже в составе скоплений? И отличаются ли своими глобальными свойствами S0-галактики, родившиеся в группах, от S0-галактик, родившихся в скоплениях, раз механизмы формирования у них разные? Честно говоря, вот этого еще никто не проверял. А вот что проверить легко и что мы действительно проверили — действительно ли близкие к нам линзовидные галактики менее 7—8 млрд лет назад были спиральными, то есть имели протяженные диски с газом и звездообразованием. Это ключевой вопрос, не зависящий от деталей механизмов превращения галактик — только от эпохи этого превращения.

На 6-м телескопе CAO РАН с помощью спектрографа SCORPIO [18], работавшего в моде длинной щели, мы получили спектры для выборки близких линзовидных галактик — очень «глубокие» спектры, снятые с экспозицией 2—3 ч, чтобы дотянуться до внешних областей дисков, имеющих низкую поверхностную яркость. А затем мы промоделировали линии поглощения в этих спектрах методом эволюционного синтеза с тем, чтобы определить средний возраст звезд, а также их химический состав. И оказалось, что у большинства близких линзовидных галактик средний возраст звезд очень старый; 60 % галактик вообще имеют звездный диск старше 10 млрд лет. И соотношение элементов — магния и железа — в звездах этих дисков далеко не солнечное: магния больше в 2—3 раза по отношению к железу [19]. Это однозначно означает, что 4—5 млрд лет назад эти диски не могли быть звездообразующими дисками

спиральных галактик, иначе средний возраст звезд был бы меньше 8 млрд лет, а соотношение элементов — солнечное, как в тонком диске нашей Галактики. Нынешний старый возраст дисков линзовидных галактик означает, что на $z = 1$ в них уже не шло звездообразование, а переобогащение магнием означает, что эти крупномасштабные звездные диски сформировались когда-то очень быстро.

Итак, линзовидные галактики формировались где-то на $z \approx 2$, за время, меньшее 1 млрд лет. И те голубые галактики, которые у нас на глазах превращаются в красные на $z = 0.4$ (эффект Батчера—Эмлера), к линзовидным галактикам и их происхождению прямого отношения не имеют. Все сценарии, и гравитационные, и газодинамические, связанные с недавней аккрецией галактик на скопления и богатые группы, можно закрыть. Надо придумать что-то кардинально новое. Что? Диски линзовидных галактик не похожи по звездному составу на тонкий диск нашей (спиральной) Галактики, однако они удивительно похожи на *толстый* диск нашей Галактики. Совпадает все: старый возраст звезд, старше 10 млрд лет, переобогащение магнием, общая низкая металличность звезд. . . А может быть, тогда разумно отождествить линзовидные галактики с «недоделанными» спиральными? Ведь если бы в нашей Галактике 8—9 млрд лет назад (то есть на $z = 1$) не начал формироваться тонкий диск, она сейчас бы была линзовидной. . . Она и была линзовидной между $z = 2$ и $z = 1$! Вот эта аналогия и подтолкнула меня к предложению совсем нового сценария эволюции дисковых галактик — сценария, где quenching не играет решающей роли, а на главную роль выходит другой эффект, который вообще-то уже давно считают ключевым: эффект аккреции холодного газа извне.

Что я думаю про эволюцию дисковых галактик и почему это конструктивно

Аккреция газа на диски спиральных галактик — это как призраки в британской массовой культуре: все о них говорят, но никто их не видел (цитата из Ларошфуко, но у него это сказано про любовь, а не про призраков). Все признают, что без постоянной аккреции газа извне спиральные галактики существовать не могут. Почему? Тому есть несколько веских причин. Первая: если разделить современный запас газа в диске типичной спиральной галактики на ее современный же темп звездообразования, то получится, как правило, 2—3 млрд лет. Это мало! Диски спиральных галактик формируют

звезды в квазистационарном режиме по крайней мере в течение последних 8 млрд лет — начиная с красного смещения 1. Откуда же они все это время брали газ для звездообразования? Общественное мнение склоняется к такому ответу: они брали газ из внешних резервуаров, и темп аккреции холодного газа извне примерно равнялся всегда темпу звездообразования в диске. Другими словами, сколько газа прибыло, столько тут же и убыло. Второе веское основание для предположения о постоянной аккреции газа извне, это химическая эволюция дисковых галактик. Например, в нашей Галактике уже измерены металличности огромных выборок звезд тонкого диска, построены зависимости возраст—металличность и показано, что такой зависимости практически нет. Для замкнутой системы это немыслимо: звезды все время формируются, проходят свой путь эволюции через серию термоядерных реакций и обязательно производят при этом тяжелые (тяжелее водорода) химические элементы. То есть если звезды образуются (и умирают) в галактике, ее металличность, как в газе, так и в формирующихся из газа звездах, должна неуклонно расти со временем. А она в нашей Галактике держится на одном и том же среднем солнечном значении последние 8—9 млрд лет. Есть старые рассеянные скопления, например NGC 6791, которые при возрасте более 8 млрд лет имеют металличность, в 2 раза выше солнечной! Как это может быть? Путем размышлений и перебора вариантов исследователи сошлись на единственном выходе: такое может быть, если внутренний газ диска Галактики, непрерывно пополняемый новыми тяжелыми элементами в процессе эволюции звезд, непрерывно же разбавляется падающим извне газом низкой (лучше бы вообще нулевой) металличности. И темп этой внешней аккреции должен быть такой же, какой необходим и для квазистационарного звездообразования: несколько масс Солнца в год.

В общем, все согласны, что эволюция дисковых галактик «управляется» постоянной интенсивной аккрецией холодного газа извне. Но откуда берется этот газ? Вся проблема в том, что его резервуары до сих пор не обнаружены в наблюдениях. Одно время все сильно надеялись на космологов. Действительно, если привязывать формирование индивидуальных галактик (или индивидуальных темных гало) к иерархическому гравитационному сгущиванию темной материи, то при обособлении темного гало с типичной массой крупной дисковой галактики вириальная температура в нем будет порядка миллиона Кельвинов, и газ, следуя за темной материей и вириализуясь, распределится по всему объему темного гало именно с такой температурой.

Дальнейшая эволюция, мыслимая на качественном уровне, такова: газ излучает (в рентгене), теряет энергию, но не момент, остывает и постепенно оседает в диск. То есть постоянная аккреция газа с первичным (чисто водородно-гелиевым) химическим составом в диск галактики обеспечивается сама собой; и это по определению первичный газ. Какое-то время проблема считалась решенной. Однако время шло, чувствительность рентгеновских телескопов все повышалась, и несколько лет назад все вдруг осознали, что предсказанных космологами рентгеновских гало у крупных спиральных галактик не видно. Ну то есть рентгеновские наблюдения уже настолько глубоки и точны, что какой-то рентген вокруг самых массивных спиральных галактик виден; но только этого газа в лучшем случае немногие проценты от того, что нужно для поддержания нормальной эволюции галактического диска. И химический состав у него, похоже, совсем не первичный. Короче, это не первичные барионы, а выброшенный галактическими фонтанами из областей звездообразования собственный газ галактического диска. То есть постоянный приток газа извне *это* рентгеновское гало обеспечить не может. Поиски источников внешней аккреции газа на галактические диски продолжаются. Сейчас вся надежда — на ультрафиолет: там еще как следует не искали, и если газ чуть холоднее, чем рассчитывали космологи, он может обнаружиться в ультрафиолетовом диапазоне спектра.

Хотя аккреция газа на галактические диски в должном объеме пока не наблюдается, все же мы будем исходить из того, что она существует и действует, иначе эволюцию близких дисковых галактик совсем невозможно будет объяснить.

Итак, новая концепция эволюции дисковых галактик. Предлагаю считать, что не линзовидные галактики получились из спиральных, а, наоборот, спиральные галактики получились из линзовидных, как это произошло с нашей Галактикой 8 млрд лет назад. Действительно, звездные диски линзовидных галактик старые, бедные металлами, переобогащенные магнием. Это значит, что они полностью сформировались на красных смещениях $z > 1.5-2$. Между тем спиральные галактики хорошо видны (например, в глубоких Хаббловских полях) где-то до $z \approx 1$, то есть последние 8 млрд лет; на больших красных смещениях этот морфологический тип пропадает, и в голубом населении поля начинают доминировать галактики с клочковатой морфологией. Когда впервые это обнаружилось, космологи очень обрадовались: вот же оно, иерархическое сгущивание и слияние мелких фрагментов («первичных кирпичей») в крупные

галактики. Однако позднейшие исследования кинематики показали, что каждая такая кучка сгустков — это не сливающиеся карликовые галактики, а сверхобласти звездообразования, погруженные в динамически единый диск. Характерный размер одного сгустка — около 1–1.5 кпк; под эти размеры подстроена и толщина диска галактики на $z \sim 2$. То есть в эту эпоху, около 10 млрд лет назад, в толстых, богатых газом дисках молодых галактик шло интенсивное и очень эффективное звездообразование, собранное в «кучки»; разбиение газового диска на сгустки было обусловлено гравитационной неустойчивостью, естественно развивающейся в диске, где газа чуть ли не больше по массе, чем звезд [20]. Наблюдательные оценки времени истощения газа на звезды в этих дисках — порядка 100 млн лет. Это заведомо обеспечивает переобогащение магнием в народившихся поколениях звезд. Так называемый обратный эффект — разогрев газа звездным ветром массивных звезд и вспышками сверхновых — способен «выдуть» остатки газа из диска на исходе вспышки звездообразования, и из «пятнистого» диска с мощным звездообразованием мы через 100 млн лет получим типичную линзовидную галактику. После ухода газа спиральные ветви развиваться не смогут, потому что эти звездные диски будут толстыми и относительно горячими динамически, то есть устойчивыми к внутренним возмущениям.

Теперь смотрим, что происходит с этими линзовидными галактиками на $z < 1$. Начинается «сбор» групп галактик, позднее собираются и скопления. В плотном окружении соседей галактика может лишиться своего внешнего газового резервуара (мы предполагаем, что изначально он у нее есть; это может быть, например, система богатых газом спутников); в разреженном окружении, в «поле», у галактики больше шансов сохранить внешний газовый резервуар нетронутым. Если она сохранила этот резервуар, из него начинается плавная аккреция холодного газа в диск, и линзовидная галактика превращается в спиральную, и будет спиральной, пока хватает газа во внешнем резервуаре. В плотном же окружении, лишившись своего газового резервуара, галактика навсегда остается линзовидной. Так можно объяснить доминирование линзовидных галактик в скоплениях и доминирование спиральных галактик в поле. Более того, попав впервые в скопление на $z \sim 0.7$ –1 и подвергнувшись гравитационному «насилию» (harassment) и лобовому давлению горячей межгалактической среды, линзовидная галактика может быстро «уронить» запасы своего холодного газа в центр, там вспыхнет звездообразование, которое увеличит ее балдж; а мы будем наблюдать

на $z > 0.5$ голубые линзовидные галактики в скоплениях. Но их диски это звездообразование не затронет, поэтому сейчас, на $z = 0$, мы видим, что диски в линзовидных галактиках старые, а вот балджи, как правило, моложе дисков, и средний возраст звезд в них около 6 млрд лет, что соответствует последней вспышке звездообразования на $z = 0.5\text{--}0.7$.

Какие проблемы решает новая концепция, почему она перспективнее старой? Кроме ключевого факта, который сподвигнул нас на кардинальное изменение концепции, — результата о старом возрасте звездных дисков близких линзовидных галактик — есть еще целый ряд результатов, не получавших до сего времени вразумительного объяснения. Например, Сидней Ван ден Берг [21] уже давно настойчиво указывает, что линзовидные галактики в среднем менее массивны, чем ранние спиральные, которые считаются их «предками». Более того, детальная статистика близких дисковых галактик обнаруживает, что

- и отдельно взятые балджи линзовидных галактик в среднем менее массивны и ярки, чем балджи ранних спиральных галактик [22];
- а если взять в распределении светимостей галактических компонент узкий срез для линзовидных и спиральных галактик на одинаковых по светимости (в фильтре K) балджах, то выясняется, что при одинаковых балджах ранних спиральных галактик, Sa-Sb, имеют более массивные (яркие в K -фильтре) диски [23];
- и наконец, на известном соотношении Талли—Фишера, связывающем скорость вращения со светимостью галактик, последовательность линзовидных галактик идет параллельно последовательности спиральных галактик, но ниже, на половину звездной величины в K -фильтре; Вильямс с соавторами [24] делают вывод, что линзовидные галактики в среднем меньше спиральных.

Все это естественно укладывается в нашу концепцию, согласно которой спиральные галактики — это бывшие линзовидные, имевшие возможность достроить (то есть увеличить) свои диски (а в некоторых случаях и балджи) в последние 8 млрд лет. И наконец, совсем свежий забавный статистический результат. Караченцева и соавторы [25], исследуя свой каталог изолированных галактик, отмечают, что лучевые скорости мелких спутников изолированных (то есть рас-

положенных в областях низкой плотности окружения) галактик ранних типов (в основном S0) значительно сильнее отличаются от скорости «хозяина», чем скорости спутников спиральных галактик. В рамках нашей концепции это объясняется просто: только галактики, у которых система спутников динамически «горячая», устойчивая против аккреции, смогли сохранить свой линзовидный статус. Спутники же с малыми относительными скоростями охотно аккрецируют на «хозяина» и превращают его в спиральную галактику, поставляя топливо для звездообразования в диск.

Библиографические ссылки

1. *Hubble E. P.* Realm of the Nebulae. — 1936.
2. *Naim A., Lahav O., Buta R. J. et al.* A comparative study of morphological classifications of APM galaxies // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1995. — Vol. 274. — P. 1107—1125. [arXiv:astro-ph/9502078](#).
3. *Dressler A.* Galaxy morphology in rich clusters — Implications for the formation and evolution of galaxies // Astrophys. J. — 1980. — Vol. 236. — P. 351—365.
4. *Dressler A., Oemler A., Jr., Couch W. J. et al.* Evolution since $Z = 0.5$ of the Morphology-Density Relation for Clusters of Galaxies // Astrophys. J. — 1997. — Vol. 490. — P. 577. [arXiv:astro-ph/9707232](#).
5. *Fasano G., Poggianti B. M., Couch W. J. et al.* The Evolution of the Galactic Morphological Types in Clusters // Astrophys. J. — 2000. — Vol. 542. — P. 673.
6. *Butcher H., Oemler A. J.* The evolution of galaxies in clusters. I — ISIT photometry of C1 0024+1654 and 3C 295 // Astrophys. J. — 1978. — Vol. 219. — P. 18.
7. *Byrd G., Valtonen M.* Tidal generation of active spirals and S0 galaxies by rich clusters // Astrophys. J. — 1990. — Vol. 350. — P. 89.
8. *Moore B., Katz N., Lake G. et al.* Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies // Nature. — 1996. — Vol. 379. — P. 613.
9. *Засов А. В.* Дефицит HI в спиральных галактиках скопления Virgo // Письма в Астрон. журн. — 1978. — Т. 4. — С. 487.

10. *Larson R. B., Tinsley B. M., Caldwell C. N.* The evolution of disk galaxies and the origin of S0 galaxies // *Astrophys. J.* — 1980. — Vol. 237. — P. 692.
11. *Cowie L. L., Songaila A.* Thermal evaporation of gas within galaxies by a hot intergalactic medium // *Nature.* — 1977. — Vol. 266. — P. 501–503.
12. *Quilis V., Moore B., Bower R.* Gone with the Wind: The Origin of S0 Galaxies in Clusters // *Science.* — 2000. — Vol. 288. — P. 1617.
13. *Bekki K., Couch W. J.* Transformation from spirals into S0s with bulge growth in groups of galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 415. — P. 1783–1796. 1105.0531.
14. *Boselli A., Gavazzi G.* Environmental Effects on Late-Type Galaxies in Nearby Clusters // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2006. — Vol. 118. — P. 517–559. arXiv:astro-ph/0601108.
15. *Kronberger T., Kapferer W., Ferrari C. et al.* On the influence of ram-pressure stripping on the star formation of simulated spiral galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 481. — P. 337–343. 0801.3759.
16. *Gunn J. E., Gott J. R., III.* On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution // *Astrophys. J.* — 1972. — Vol. 176. — P. 1.
17. *Wilman D. J., Oemler A., Jr., Mulchaey J. S. et al.* Morphological Composition of $z \sim 0.4$ Groups: The Site of S0 Formation // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 692. — P. 298–308. 0811.4425.
18. *Afanasiev V. L., Moiseev A. V.* The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // *Astronomy Letters.* — 2005. — Vol. 31. — P. 194–204. arXiv:astro-ph/0502095.
19. *Sil'chenko O. K., Proshina I. S., Shulga A. P., Koposov S. E.* Ages and abundances in large-scale stellar discs of nearby S0 galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 427. — P. 790–805.
20. *Bournaud F., Elmegreen B. G., Martig M.* The Thick Disks of Spiral Galaxies as Relics from Gas-rich, Turbulent, Clumpy Disks at High Redshift // *Astrophys. J. Lett.* — 2009. — Vol. 707. — P. L1–L5. 0910.3677.
21. *van den Bergh S.* What are S0 Galaxies? // *Astrophys. J. Lett.* — 2009. — Vol. 694. — P. L120–L122. 0902.4718.

22. *Graham A. W., Worley C. C.* Inclination- and dust-corrected galaxy parameters: bulge-to-disc ratios and size-luminosity relations // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2008. — Vol. 388. — P. 1708—1728. 0805.3565.
23. *Laurikainen E., Salo H., Buta R. et al.* Photometric scaling relations of lenticular and spiral galaxies // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2010. — Vol. 405. — P. 1089—1118. 1002.4370.
24. *Williams M. J., Bureau M., Cappellari M.* The Tully-Fisher relations of early-type spiral and S0 galaxies // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2010. — Vol. 409. — P. 1330—1346. 1007.4072.
25. *Karachentseva V. E., Karachentsev I. D., Melnyk O. V.* Faint companions of isolated 2MIG galaxies // Astrophysical Bull. — 2011. — Vol. 66. — P. 389—406. 1112.2821.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА: РАВНОВЕСИЕ, УСТОЙЧИВОСТЬ И ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

В одном из последних своих обзоров [1] Ю. Паркер отметил: «Sunspots are the classic example of long standing ignorance, well known to observation for centuries, possessing fascinating internal fine structure, and still not understood from the basic laws of physics. Why is the Sun compelled by the basic laws to form sunspot at all?». Действительно, несмотря на то, что изучению пятен в солнечной физике всегда уделялось большое внимание, несмотря на успехи последнего времени, связанные с численным 3D-моделированием процесса образования пятна [2], в физике солнечных пятен до сих пор остаются без ответа вопросы, принципиально важные для понимания природы этих образований. Перечислим некоторые из них.

1. Солнечные пятна — долгоживущие, а следовательно, достаточно устойчивые магнитные структуры. Чем обусловлена их устойчивость в целом? Магнитное поле в пятне сжато, его энергия повышена, значит, оно не может обеспечить устойчивость системы. Подфотосферные, сходящиеся к пятну течения плазмы слишком слабы; по данным локальной гелиосейсмологии, их скорости не превышают 1 км/с [3], поэтому проблеме устойчивости пятен они также не решают.
2. Почему напряженность магнитного поля пятен ограничена интервалом примерно от 0.7 до 3—4, крайне редко, 1 раз в столетие, 5—6 кГс, и никогда не наблюдалось пятен с полем в 10 или 20 кГс, хотя равновесие таких полей теоретически возможно?
3. Магнитное поле в пятнах малого размера со слаборазвитой или отсутствующей полутенью систематически ниже, чем в крупных, значит, равновесное магнитное поле зависит от размера пятна. Какова эта зависимость?
4. Почему на Солнце не наблюдается пятен очень большого размера, занимающих значительную часть диска?

5. Отчего в крупных пятнах возникают светлые мосты, делящие их на части?
6. Солнечное пятно, как достаточно обособленное и устойчивое образование, может совершать колебания около некоторого положения его равновесия. Каков период таких собственных колебаний пятна и как он зависит от напряженности магнитного поля в пятне?
7. Эффективная температура пятна ниже фотосферной примерно на 2 000 К, а его магнитное поле много выше фонового поля активной области. Согласно Паркеру [4] пятно — кластер отдельных, тесно сжатых боковым давлением окружающей среды магнитных трубок. Но как далеко, до каких глубин такое сильное вертикальное поле с холодной плазмой проникает в конвективную зону Солнца? Каково строение подфотосферных слоев пятна?

Задача данной работы — найти ответы на поставленные выше вопросы в рамках физической модели солнечного пятна, основанной на данных локальной гелиосейсмологии и на термодинамическом описании магнитоплазменной системы определенной геометрической формы, погруженной во внешнюю гидростатическую среду с известными свойствами.

Рассматривается модель круглого униполярного солнечного пятна с нижней границей холодной плазмы и сильного магнитного поля на глубине около 4 Мм под фотосферой в согласии с данными локальной гелиосейсмологии. Аналитически задается конфигурация магнитного поля пятна, близкая к реально наблюдаемой и обладающая, подобно полю круглого соленоида, свойством самоподобия. На основе термодинамического подхода рассчитаны условия равновесия солнечного пятна по горизонтали и вертикали с учетом его гравитационной энергии и давления внешней среды. Впервые теоретически получена зависимость равновесного магнитного поля в центре пятна B_0 от радиуса тени a и основных параметров фотосферы. В очень малых пятнах поле $B_0 \approx 700$ Г, затем оно монотонно возрастает, стремясь с ростом a к некоторой предельной величине (около 3 700 Г), которая определяется плотностью фотосферы, ускорением силы тяжести на поверхности Солнца и отношением радиуса всего пятна к полутени a_p к радиусу тени a . Показано, что подфотосферные течения в окрестности пятна, являясь следствием, а не причиной его образования, не играют существенной роли в поддер-

жании равновесия и устойчивости пятна. Стабильность пятна обеспечена понижением его гравитационной энергии, которое вызвано перераспределением плотности массы по вертикали при образовании вильсоновской депрессии, глубина которой линейно растет с напряженностью магнитного поля пятна. Область устойчивых равновесий пятна ограничена: при a больше некоторого предельного значения (12—20 Мм в зависимости от конфигурации поля) система теряет устойчивость. Этим объясняется отсутствие на Солнце пятен очень большого размера и появление светлых мостов в крупных пятнах. Наиболее устойчивы пятна с $B_0 \approx 2\,600\text{ Г}$ и $a \approx 5\text{ Мм}$. Для таких пятен период их собственных колебаний, как целостных магнитных структур, минимален и составляет, согласно расчетам, 12.5 ч, что соответствует наблюдаемой величине.

Библиографические ссылки

1. *Parker E. N.* Solar Magnetism: The State of Our Knowledge and Ignorance // Space Sci. Rev. — 2009. — Vol. 144. — P. 15—24.
2. *Rempel M.* High-latitude Solar Torsional Oscillations during Phases of Changing Magnetic Cycle Amplitude // Astrophys. J. Lett. — 2012. — Vol. 750. — P. L8.
3. *Kosovichev A. G.* Photospheric and Subphotospheric Dynamics of Emerging Magnetic Flux // Space Sci. Rev. — 2009. — Vol. 144. — P. 175—195. 0901.0035.
4. *Parker E. N.* Sunspots and the physics of magnetic flux tubes. I — The general nature of the sunspot. II — Aerodynamic drag // Astrophys. J. — 1979. — Vol. 230. — P. 905—923.

ВОЗМОЖНОСТЬ МГД-ПРОЦЕССА НА СТАДИИ АККУМУЛЯЦИИ ЗЕМЛИ

В работе исследуется возможность развития МГД-динамо на стадии аккумуляции Земли. Для описания условий в растущей планете используются результаты численного моделирования предложенного ранее механизма аккумуляции Земли [1, 2]. При возникновении электропроводного ядра изучается возможность генерации в нем геомагнитного поля. Критерием возникновения генерации поля считается возникновение внутри слоя областей, значения магнитной индукции в которых превышают пороговое значение, превышающее значение внешнего поля. Задача решается численно методом конечных разностей в 3D-модели для сектора сферического слоя в естественных переменных совместно с задачей об аккумуляции планеты.

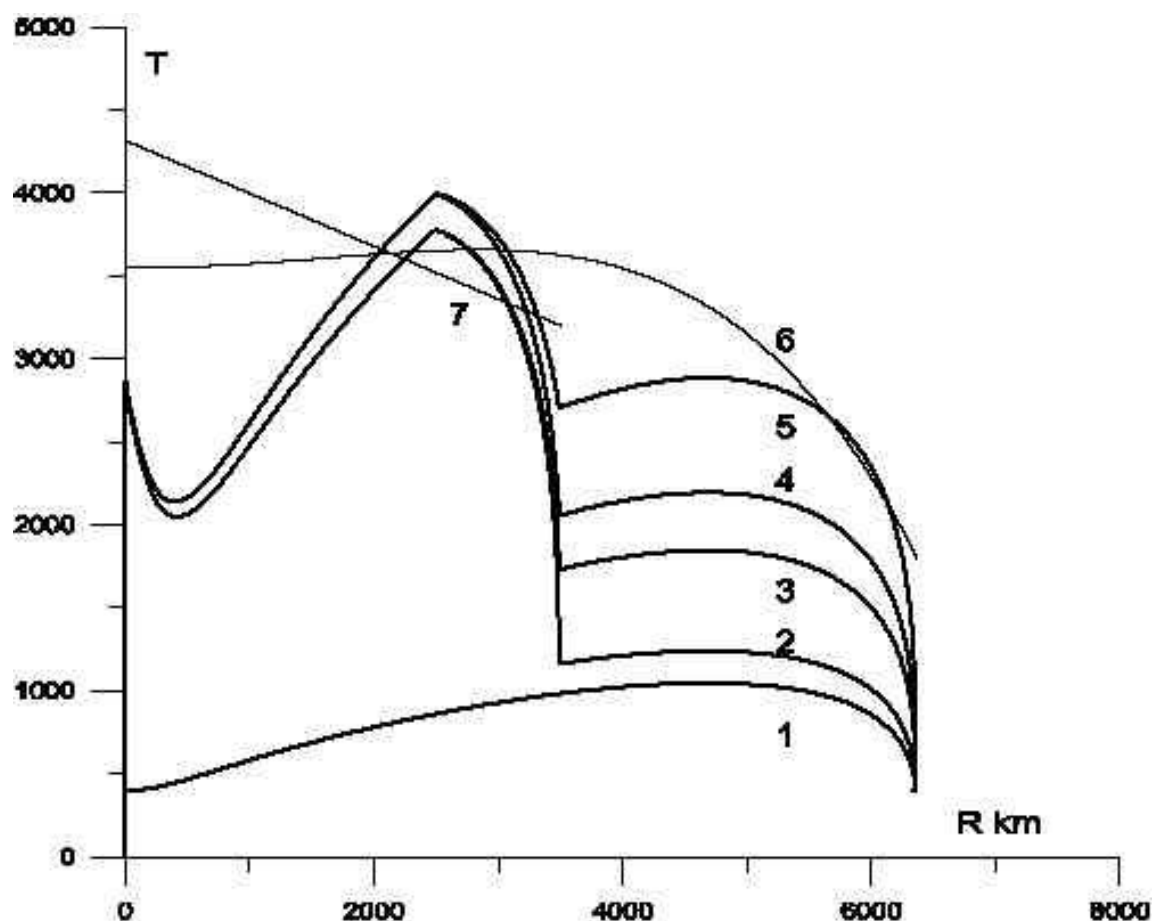
In the paper we had researched the possibility of MGD-dynamo development on the stage of Earth's accumulation. The description of PT-conditions evolution in the growing planet is based on the results of numerical modeling of Earth's accumulation mechanism, which we had suggested earlier [1, 2]. The possibility of geomagnetic field generation is searched by appearing a melted layer in the forming core. The criterion of filed generation appearance is considered the appearance into the layer some areas, for which the values of magnetic induction exceed the threshold value, which exceeds the value of the outer field. The problem is solved by the finite-difference method in a 3-D model for a sector of the spherical layer in natural variables together with the planet accumulation problem.

Введение

Одной из нерешенных проблем физики Земли является вопрос о времени возникновения и начала работы МГД-процесса генерации геомагнитного поля. Обычно предполагается [3], что возраст пород, сохранивших остаточную намагниченность, дает оценку возраста земного динамо. За последние годы обнаружены такие породы все более древнего возраста, вплоть до значений 3.8—3.9 млрд лет. Все

более популярной становится идея о том, что геомагнитное поле возникло еще на стадии формирования Земли. Однако ранние модели аккумуляции планеты [4] приводили к формированию однородной и сравнительно холодной планеты (см. рисунок, кривая 1). Земное ядро в этих моделях могло образоваться только спустя 1.5—2 млрд лет после завершения основного этапа аккумуляции. Такие результаты не смогли объяснить не только наличие пород со значительно более древней намагниченностью, но и результаты изотопной геохимии. Долгое время в качестве наиболее убедительной рассматривалась модель мегаимпакта [5] по которой раннее формирование ядра и мантии Земли явилось следствием столкновения сформировавшейся протопланеты с телом массы Меркурия. Однако и все динамические модели аккумуляции Земли [4, 6], и оценки по свинец-свинцовой системе [7] приводят к заключению о том, что длительность аккумуляции планеты составляла около 10^8 лет, тогда как изотопные результаты по W-Hf системе свидетельствуют об очень раннем, за 5—10 млн лет, разделении геохимических резервуаров ядра и мантии [8]. Это означает, что разделение геохимических резервуаров ядра и мантии должно было произойти еще до этапа достижения Землей ее современной массы.

В [1, 2] показано, что учет выделения энергии при распаде короткоживущих радиоактивных элементов, и прежде всего ^{26}Al , достаточен для нагрева даже малых тел, размера около 50—100 км, до температур плавления железа, и реализуется принципиально новый механизм дифференциации. Объединяются расплавленные, преимущественно железного состава, внутренние части протопланетных зародышей, а холодные силикатные осколки возвращаются в зону питания. Только после того как гравитационный радиус увеличится, выросшая область будущего ядра оказывается способной удерживать и осколки силикатной оболочки. РТ-условия в формирующейся области ядра ко времени достижения его современной массы оказываются таковы, что внутреннее ядро находится в твердом состоянии, а внешнее — в расплавленном. Тем самым могут реализоваться условия для МГД-динамо. При рассмотрении этой задачи, в отличие от достаточно изученного механизма генерации геомагнитного поля в уже сформировавшейся планете [9, 10], необходимо учитывать изменение размера области, в которой реализуется процесс и изменение гравитационного ускорения в процессе аккумуляции планеты.



Возможные варианты распределения температуры к моменту достижения планетой $R = 6300$ км.: 1 — аккумуляция из мелких частиц, выделение тепла короткоживущими радиоактивными элементами не учитывается, k в области растущего ядра принято $k = 0.001$, в области мантии $k = 0.001$; 2 — учитывается выделение тепла короткоживущими радиоактивными элементами, k в области растущего ядра $k = 0.3$, в области мантии $k = 0.002$; 3 — k в области растущего ядра $k = 0.4$, в области мантии $k = 0.01$; 4 — k в области растущего ядра $k = 0.4$, в области мантии $k = 0.02$; 5 — k в области растущего ядра $k = 0.5$, в области мантии $k = 0.05$; 6 — зависимость температуры плавления силикатного вещества мантии от давления [11]; 7 — зависимость температуры плавления вещества ядра от давления [3]

Постановка задачи и решение

Задача решается в два этапа. На первом этапе численно решается система уравнений, описывающих аккумуляцию планеты (1), и система уравнений (2–6), с помощью которых можно описать распределение РТ-условий во внутренних областях растущей планеты. На этом этапе используется сферически-симметричная модель с задаваемым распределением плотности. Для скорости изменения массы растущей протопланеты используется уравнение Сафронова [4]

$$\frac{\partial m}{\partial t} = 2(1 + 2\theta)r^2\omega \left(1 - \frac{m}{M}\right) \sigma, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость орбитального движения; σ — поверхностная плотность вещества в зоне «питания» планеты; M — современная масса планеты; r — радиус растущего зародыша; θ — статистический параметр, учитывающий распределение частиц по массам и скоростям в зоне «питания».

Система уравнений (2–6) позволяет получить распределение температуры и давления в многофазной среде внутренних областей растущей планеты:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} \right] = -\nabla P + \eta \Delta \vec{V} + \left(\frac{\eta}{3} + \xi \right) \nabla (\nabla \vec{V}) - \rho \Delta W, \quad (2)$$

$$\rho T \left[\frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) S \right] = \lambda \Delta T + Q, \quad (3)$$

$$\Delta W_1 = -4\pi\gamma\rho, \quad W = W_1 + W_2, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{V}) = 0, \quad (5)$$

$$L \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial t} = \vec{q}|_{\xi+0} - \vec{q}|_{\xi-0}, \quad (6)$$

где \vec{V} — скорость жидкости; P — давление; S — энтропия; W_1 — гравитационный потенциал; W_2 — центробежный потенциал; ρ — плотность; η и ξ — коэффициенты первой и второй вязкости; λ — коэффициент теплопроводности; γ — гравитационная постоянная; Q — суммарная мощность внутренних источников энергии в единице объема; L — теплота фазового перехода; $\frac{\partial \vec{\psi}}{\partial t}$ — положение границы

раздела фаз; $\vec{q}|_{\xi+0}$, $\vec{q}|_{\xi-0}$ — плотность теплового потока соответственно перед и за фазовой границей; ∇ и Δ — операторы «набла» и Лапласа.

Трудности доставляет уже решение краевых задач для первого уравнения (2) этой системы, которое называют уравнением Навье—Стокса. Даже в приближении с постоянными коэффициентами вязкости, как это использовано при его записи в виде (3), в 3D-сферическом слое нахождение численного решения представляет существенную проблему. Кроме того, в рамках уравнения (2) затруднительно описать вынужденное конвективное перемешивание вещества вблизи поверхности растущего тела при падении отдельных тел.

Реальные вычислительные возможности до недавнего времени позволяли использовать только сильно усредненное описание в сферически симметричной модели. Распределение температуры в теле увеличивающегося радиуса при таком подходе находится из численного решения краевой задачи для уравнения теплопроводности с учетом возможности появления расплава без явного выделения положения границы фронта кристаллизации и параметрического учета конвективного теплопереноса в расплаве по [12]

$$c_{ef}\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{ef}\nabla T) + Q, \quad (7)$$

где c_{ef} , λ_{ef} — эффективные значения теплоемкости и теплопроводности, которые учитывают теплоту плавления в задаче Стефана по [13] и наличие конвективного теплопереноса; T — искомая температура в точке в момент времени t ; Q — объемная мощность внутренних источников тепла. Задача решалась методом конечных разностей с использованием полностью неявной монотонной, консервативной схемы. Поэтому реально вместо системы (1—6, 8) решалась система (1, 7, 8). В уравнениях (1), (7), (8) шаг по временной и пространственной сеткам используется один и тот же. Здесь размерный шаг по пространственной сетке постоянный и составляет 1 км. Шаг по временной сетке переменный и при выбранном распределении плотности, как функции глубины, вычисляется из уравнения (1). С использованием этого уравнения на каждом временном шаге вычисляются масса растущей планеты и распределение литостатического давления во внутренних областях. Для каждого значения достигнутого размера растущей планеты вычисляется распределение температуры плавления. В ядре зависимость температуры плавления в основном железного состава вычисляется по [3]. В области

формирующейся преимущественно силикатной мантии используется зависимость температуры плавления от давления по [11]. Зона полного и частичного плавления определялась для каждого временного слоя по сопоставлению вычисленного распределения температуры с распределением температуры плавления на данной глубине. На поверхности растущего тела заданы условия, обеспечивающие баланс поступающей части потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тел, затраты тепла на нагревание поступившего вещества и переизлучаемого в пространство теплового потока с учетом прозрачности внешней среды [14]

$$k \rho \frac{\gamma M}{r} \frac{dr}{dt} = \varepsilon \sigma [T^4 - T_1^4] + \rho c_p [T - T_1] \frac{dr}{dt}, \quad (8)$$

где ρ — плотность вещества; γ — гравитационная постоянная; M — масса растущей планеты; r — ее радиус; T и T_1 — соответственно температура тела на границе и внешней среды; ε — коэффициент прозрачности среды; c_p — удельная теплоемкость; k — доля преобразованной в тепло потенциальной энергии.

Полученные распределения температуры и гидростатического давления используются далее в качестве граничных условий в 3D блоке сферического слоя. Предполагается, что для рассматриваемой длительности процесса аккумуляции развитые конвективные течения электропроводного вязкого вещества реализуются только в слое расплава формирующегося ядра. Далее численно решается задача о МГД-течении в 3D блоке с учетом того, что верхняя граница слоя перемещается и соответственно масса тела и гравитационное ускорение увеличиваются. В приближении Буссинеска процесс может быть описан в виде

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} (\nabla \vec{V}) \right] = -\nabla P + \mu \Delta \vec{V} + 2\rho \vec{V} \times \vec{\Omega} - \rho \nabla W + \left[\nabla \times \vec{B} \right] \times \vec{B}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \text{rot} [\vec{V} \times \vec{B}] = D_m \Delta \vec{B}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} (\nabla T) = \chi \Delta T, \quad (11)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0, \quad \text{div} \vec{V} = 0. \quad (12)$$

Граничные условия

$$\text{для } r = R^{N+1} : \begin{cases} V_Z = V_\theta = V_\lambda = 0, \\ B_Z = B_0 \cos \theta, \quad B_\theta = B_0 \sin \theta, \\ P = 0, \quad T = T(N+1, 1, 1, 1); \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{для } r = r_- = r(l) : \begin{cases} V_Z = V_\theta = V_\lambda = 0, \\ \frac{\partial B_Z}{\partial z} = 0, \\ P = 0, \quad T = T(l, 1, 1, 1). \end{cases} \quad (14)$$

Использование приближения Буссинеска существенно упрощает уравнение (9), а в уравнении энергии мы не учитываем выделение тепла при вязком трении и джоулева тепла. Задача решается с использованием конечных разностей в переменных скорость-давление. Численный алгоритм решения задачи в естественных переменных строится на основе метода расщепления. Сначала на следующем временном слое находится для выбранного распределения плотности новое значение массы растущей протопланеты, радиус которой увеличивается на постоянную величину δr . Здесь значение этого шага принимается $\delta r = 1$ км. Тогда уравнение (1) позволяет определить значение переменного шага по времени δt , за которое произошло это увеличение размера протопланеты. Они затем используется при решении системы (9)–(12). Для нового значения массы тела, сформированного из слоев плотности ρ и мощности δr , находится распределение литостатического давления. Это позволяет по имеющимся феноменологическим соотношениям определить распределение температуры плавления вещества заданного состава как функции давления или глубины. Затем с использованием полностью неявной схемы численно решается краевая задача (7)–(8). По сопоставлению найденного из (7)–(8) распределения температуры на $n+1$ временном слое с полученной кривой плавления производится проверка на возникновение расплавленных областей.

Моделирование показало, что зоны проплавления в формирующемся ядре Земли образуют односвязную область, локализованную вблизи поверхности растущего тела (см. рисунок). По полученным для этого временного слоя распределениям гравитационного ускорения, градиента температуры и мощности слоя расплава L ($L = R^{n+1} - r_-$), где R^{n+1} — радиус протопланеты к моменту времени на $n+1$ временном слое; r_- — координата нижней границы слоя расплава) определяется число Релея, Ra . Как только число Релея превысит его критическое значение, $Ra > Ra^*$, включается блок решения краевой задачи для системы уравнений (9)–(12) в 3D области

$M \{ R^{n+1}, r_-; h_\theta, \pi/2 - h_\theta; h_\lambda; \pi/2 - h_\lambda \}$. По каждой переменной использовалась равномерная сетка. Для описания переменных \vec{V}, \vec{B}, P, T применялась разностная сетка по пространству $3501 \times 91 \times 91$. Для разностного представления скорости, давления, температуры и магнитной индукции используются разнесенные шахматные сетки. Давление и температура задаются в центрах разностных ячеек, компоненты векторов скорости и магнитной индукции — в центрах соответствующих граней.

Для решения уравнения (9) в естественных переменных применялась схема расщепления [15]. Для нахождения компонент векторов \vec{V}, \vec{B} использовалась схема предиктор-корректор по [16]. Уравнение Пуассона для гидростатического возмущения давления решалось методом установления во внутреннем итерационном цикле.

Результаты и обсуждение

На рисунке представлен возможный вариант распределения температуры в области формирующегося ядра Земли на стадии ее аккумуляции, полученный из решения задачи (1), (7)—(8) при значениях физических параметров, опубликованных в [2]. Из приведенных результатов видно, что в процессе аккумуляции Земли могли реализоваться две стадии, соответствующие развитию свободной конвекции при подогреве снизу: во-первых, этап, когда был еще очень значителен энергетический вклад радиоактивного распада короткоживущего элемента ^{26}Al , но масса 50—100-километрового тела, а следовательно и гравитационное ускорение были слишком малы для реализации условий конвекции; во-вторых, этап формирования внешнего ядра Земли, начиная со значения радиуса на нижней границе слоя около 2 400 км. До этого температура на верхней границе слоя расплава благодаря мощному процессу нагревания при падении тел и частиц на растущую планету при практически неупругом соударении оставалась выше, чем на нижней границе. На этой стадии гравитационное ускорение уже вполне достаточно, чтобы обеспечить свободную конвекцию. Результаты решения (9)—(12) подтвердили это качественное заключение. В интервале глубин 500—2 400 км свободная конвекция не развивается, значения компонент магнитного внутри объема остаются ниже граничных значений на внешней поверхности. Только при реализации слоя проплавления в формирую-

щемся внешнем ядре в анализируемой модели развивается свободная конвекция, и величина магнитной индукции может превышать значения, обеспечиваемые внешним полем.

Конечно, рассмотренная модель МГД течений является очень упрощенной, прежде всего потому, что используется приближение Буссинеска, вязкость вещества принимается постоянной, не учитываются джоулевы потери и при трении, не учитывается возможность вынужденного перемешивания при ударах тел. Специального исследования, в отличие от модели МГД-динамо в сформировавшейся планете [9, 10], требует рассмотрение взаимодействия протопланеты и формирующейся Луны. Это определяет величину угловой скорости вращения растущей Земли и ее изменение со временем в силе Кориолиса в (9).

Тем не менее численное моделирование показало, что уже на этапе аккумуляции внешнего ядра Земли возможна реализация условий, обеспечивающих генерацию геомагнитного поля Земли.

Библиографические ссылки

1. *Anfilogov V. N., Khachai Yu. V.* A Possible Scenario of Material Differentiation at the Initial Stage of the Earth's Formation // *Doklady Earth Sciences : Transl from Doklady Akademii Nauk.*, М. : 2005. — P. 954.
2. *Khachay Yu. V., Anfilogov V. N.* Variants of Temperature Distributions in the Earth on its Accumulation // *The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy and astronomy : Proc. of the 6th Orlov Conf.*, Kiev : 2010. — P. 197.
3. *Стейси Ф.* Физика Земли. — М. : Мир, 1972. — С. 342.
4. *Сафронов В. С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М. : Наука, 1969. — С. 244.
5. *Cameron A. B.* Origin of the Earth and Moon, ed. by R. M. Ganap. — University of Arisona Press, 2000. — P. 179.
6. *Печерникова Г. В., Витязев А. В.* Импаkты и эволюция ранней Земли // Катастрофические воздействия космических тел / Ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. — М. : Академнига, 2005. — С. 251—265.
7. *Бибикова Е. Н.* Уран-свинцовая геохронология ранних этапов развития древних щитов, Ред. Ю. А. Щуколюков. — М. : Наука, 1989. — С. 177.

8. *Jacobsen S., Yin Q.* Models of planetary accretion and core formation based on the Hf-W clock // *Geophys. Research Abstracts.* — 2003. — Vol. 5. — P. 13884.
9. *Roberts P. H., Glatzmaier G. A.* Geodynamo theory and simulations // *Rev. Mod. Phys.* — 2000. — Vol. 72. — P. 1081—1124.
10. *Glatzmaier G. A., Clune C. L.* Computational aspects of geodynamo simulations // *Comp. Sci. Eng.* — 2000. — Vol. 2. — P. 61—67.
11. *Kaula E. M.* Thermal evolution of Earth and Moon growing by planetesimal impacts // *J. Geophys. Res.* — 1979. — Vol. 84. — P. 999—1008.
12. *Тихонов А. Н., Любимова Е. А., Власов В. К.* Об эволюции зон проплавления в термической истории Земли // *ДАН СССР.* — 1969. — Т. 188, № 2. — С. 338—342.
13. *Самарский А. А., Моисеенко Б. Д.* Экономичная схема сквозного счета многомерной задачи Стефана // *Журн. вычислит. математики и матем. физики.* — 1965. — Т. 5. — С. 816—827.
14. *Жарков И. Н., Трубицын В. П.* Физика планетных недр. — М. : Наука, 1980. — С. 448.
15. *Белоцерковский О. М.* Численное моделирование в механике сплошных сред. — М. : Наука, 1984. — С. 520.
16. *Берковский В. М., Ноготов Г. Ф.* Численные методы решения задач теплопередачи. — Минск : Наука и техника, 1976. — С. 176.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТ: МЕТОД ЛАПЛАСА И МЕТОД ПВД

Изложены основные методы определения орбит небесных тел, базирующиеся непосредственно на дифференциальных уравнениях движения (прямые методы). В качестве наблюдательной базы служат современные высокоточные позиционные наблюдения астероидов, комет и ИСЗ. Подробно рассматриваются метод Лапласа и его существенная модификация — метод параметров видимого движения, использующая вместо фиксированной декартовой системы отсчета сопровождающий трехгранник.

The main methods of celestial bodies orbit determination based on the differential equations of their motion (direct methods) are presented. Modern high-precision positional observations of asteroids, comets, and artificial Earth satellites serve as a data base. Laplace method and its essential modification — apparent motion parameters method (which uses the moving trihedral instead of a fixed Cartesian reference frame) are examined in detail.

Введение

Методы определения орбит небесных тел из наблюдений, восходящие к Ньютону, Эйлеру, Лапласу и Гауссу, получили новую область применения с началом космической эры, открытой 4 октября 1957 г. запуском первого советского искусственного спутника Земли. С тех пор на протяжении уже более 50 лет задача высокоточного определения элементов орбит ИСЗ (а теперь и многочисленных фрагментов космического мусора) по разного рода наблюдательным данным, как и задача описания видимых движений спутников на основе получаемых орбит, не теряет своей актуальности. То же можно сказать об определении орбит комет и астероидов, открываемых теперь сотнями и тысячами каждый год. Традиционно высокоточные орбиты новых небесных тел определяют в два этапа. На первом используется относительно небольшое число наблюдений, покрывающих часть

(обычно малую) траектории, и в результате решения соответствующих уравнений в нашем распоряжении оказывается *предварительная*, или *первоначальная* орбита. На втором этапе орбита улучшается, привлекаются все имеющиеся наблюдения, и в результате их статистической обработки получают то, что раньше называли *окончательной* орбитой. Сейчас этот термин выходит из употребления, поскольку процесс улучшения орбит идет непрерывно, по мере поступления новых наблюдений. Заметим, что термин *улучшение орбиты* означает уточнение наших знаний об орбите и до 1957 г. был совершенно естествен. Но теперь действительно изменяют орбиты космических аппаратов, чтобы они лучше служили поставленным целям. В недалеком будущем будут изменять и орбиты малых астероидов и комет. Такие изменения называют *коррекцией* орбиты.

Здесь мы расскажем об определении первоначальной орбиты по наблюдениям небесного тела на части (обычно небольшой) его видимой траектории *прямыми методами*, использующими непосредственно дифференциальные уравнения движения, а не интегральные следствия этих уравнений.

Геометрия кривых на сфере

С древнейших времен астрономы проектируют светила на небесную (единичную по терминологии математиков) сферу \mathbb{S} . Используется центральная проекция. Именно под влиянием астрономии была создана сферическая тригонометрия, а позднее — дифференциальная геометрия кривых на произвольных поверхностях. Сферическая тригонометрия вошла неотъемлемой частью в астрономические курсы. Парадоксально, но геометрия кривых на сфере в учебниках астрономии практически не рассматривается. Между тем общие формулы дифференциальной геометрии кривых на произвольной поверхности настолько существенно упрощаются в сферическом случае, что их стоит рассмотреть отдельно, как это имеет место для кривых на плоскости. Геометрия на сфере оказывается лишь немного сложнее геометрии на плоскости (а иногда и проще, например для соприкасающейся окружности). Описанию необходимых нам элементов дифференциальной геометрии на сфере посвящен этот параграф.

Пусть A — точка на сфере \mathbb{S} ; α, δ — сферические координаты, $\mathbf{T}_\alpha, \mathbf{T}_\delta$ — орты, направленные в касательной плоскости вдоль параллели (на восток) и меридиана (на север). Если точка A движется, оставаясь на сфере, то можно определить ее вектор скорости $\mu \mathbf{T}$.

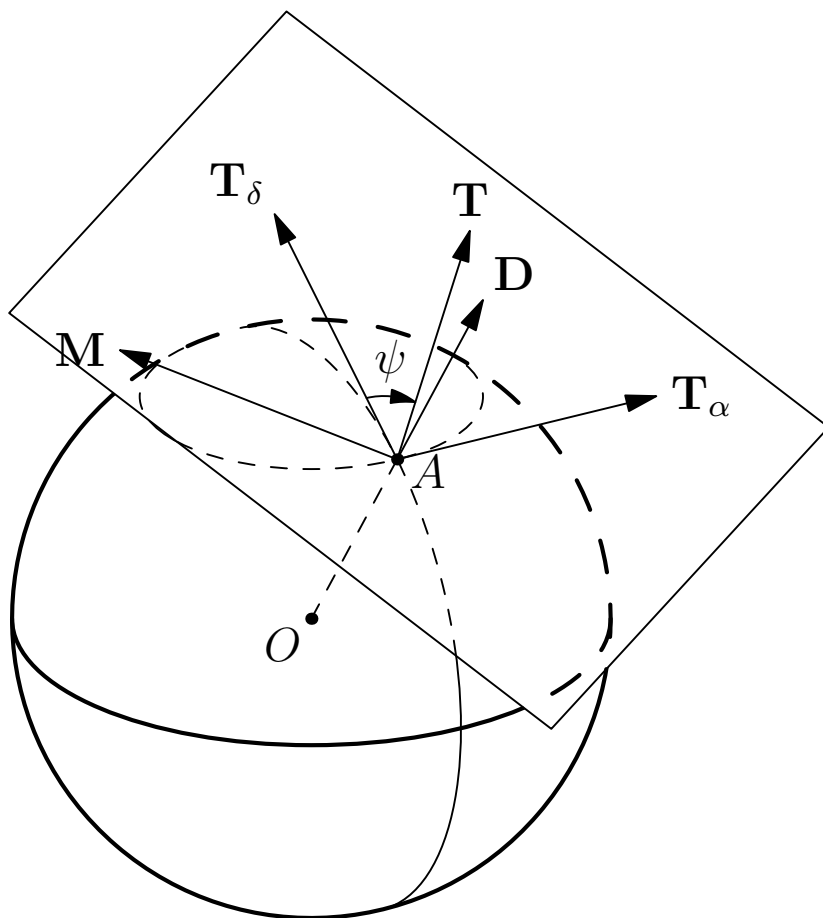


Рис. 1. Касательная плоскость и лежащие в ней орты \mathbf{T}_α , \mathbf{T}_δ , \mathbf{T} , \mathbf{M} , а также нормальный к ним орт \mathbf{D} ; ψ — позиционный угол

Вектор \mathbf{T} считаем единичным. Тогда μ будет представлять собой *собственное движение* светила A . Лежащий в касательной плоскости орт скорости можно разложить на две составляющие:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_\alpha \sin \psi + \mathbf{T}_\delta \cos \psi, \quad (1)$$

(рис. 1). Здесь ψ — позиционный угол, т. е. угол, на который надо повернуть \mathbf{T}_δ до совмещения с \mathbf{T} *по часовой стрелке*, если смотреть с конца вектора \mathbf{D} , как привыкли смотреть математики. Астрономы же смотрят не извне, а изнутри небесной сферы. Поэтому, с точки зрения находящегося в центре сферы наблюдателя, угол ψ возрастает *против часовой стрелки*. Заметим, что в учебниках астрометрии встречается определение ψ , совпадающее с только что указанным с точностью до замены направления отсчета ψ на противоположное. На практике принято $0 \leq \psi < 2\pi$ или $-\pi < \psi \leq \pi$, в теории предпочтительнее $-\infty < \psi < \infty$.

Величины μ, ψ называют *параметрами видимого движения* (ПВД) первого порядка, поскольку они выражаются через первые производные сферических координат

$$\mu \sin \psi = \dot{\alpha} \cos \delta, \quad \mu \cos \psi = \dot{\delta}. \quad (2)$$

Радиус-вектор точки A тождественно совпадает с ортом нормали \mathbf{D} к сфере (отличительное свойство сферы). Поэтому (2) можно представить в виде

$$\dot{\alpha} = \frac{D_1 \dot{D}_2 - D_2 \dot{D}_1}{D_1^2 + D_2^2}, \quad \dot{\delta} = \frac{\dot{D}_3}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2}}, \quad (3)$$

где индексы указывают на номер координаты вектора.

Наряду с лежащими в касательной плоскости ортогональными векторами $\mathbf{T}_\alpha, \mathbf{T}_\delta$, векторное произведение которых совпадает с \mathbf{D} , можно ввести лежащую в той же плоскости пару $\mathbf{T}, \mathbf{M} = \mathbf{D} \times \mathbf{T}$. Ортогональная тройка $\mathbf{T}, \mathbf{M}, \mathbf{D}$, как и $\mathbf{T}_\alpha, \mathbf{T}_\delta, \mathbf{D}$, — правая. Иными словами, вектор \mathbf{M} повернут влево от \mathbf{T} , если смотреть с конца вектора \mathbf{D} . Если же смотреть изнутри небесной сферы, то вектор \mathbf{M} повернут вправо от \mathbf{T} .

Соотношения дифференциальной геометрии [1–3] позволяют разложить производные от векторов $\mathbf{T}, \mathbf{M}, \mathbf{D}$ и даже от $\dot{\mathbf{D}}$ через сами векторы

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{T}} &= \kappa \mu \mathbf{M} - \mu \mathbf{D}, & \dot{\mathbf{M}} &= -\kappa \mu \mathbf{T}, \\ \dot{\mathbf{D}} &= \mu \mathbf{T}, & \ddot{\mathbf{D}} &= \dot{\mu} \mathbf{T} + \kappa \mu^2 \mathbf{M} - \mu^2 \mathbf{D}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь κ — геодезическая кривизна кривой, описываемой точкой A на сфере \mathbb{S} .

Параметры видимого движения второго порядка $\dot{\mu}, \dot{\psi}, \kappa$ можно найти по формулам

$$\begin{aligned} \mu \dot{\mu} &= \dot{\alpha} \ddot{\alpha} \cos^2 \delta + \dot{\delta} \ddot{\delta} - \dot{\alpha}^2 \dot{\delta} \cos \delta \sin \delta, \\ \mu^3 \kappa &= (\dot{\alpha} \ddot{\delta} - \ddot{\alpha} \dot{\delta}) \cos \delta + \dot{\alpha}^3 \cos^2 \delta \sin \delta + 2 \dot{\alpha} \dot{\delta}^2 \sin \delta, \\ \dot{\psi} &= \mu (\sin \psi \operatorname{tg} \delta - \kappa) = \dot{\alpha} \sin \delta - \mu \kappa, \\ \mu^2 \dot{\psi} &= -(\dot{\alpha} \ddot{\delta} - \dot{\delta} \ddot{\alpha}) \cos \delta - \dot{\alpha} \dot{\delta}^2 \sin \delta. \end{aligned} \quad (5)$$

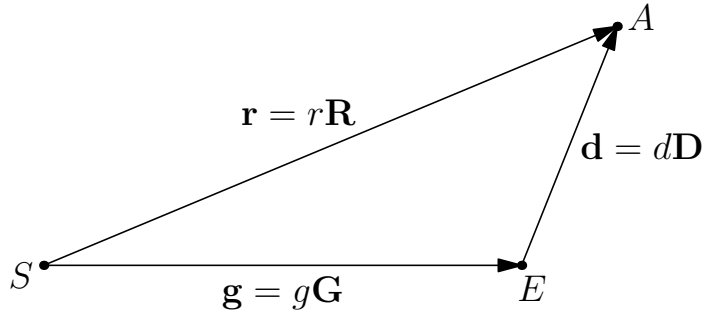


Рис. 2. Точки S , E , A и соединяющие их векторы

Более симметричны выражения параметров через компоненты вектора \mathbf{D} и их производные

$$\mu\dot{\mu} = \dot{\mathbf{D}}\ddot{\mathbf{D}}, \quad \mu^3\kappa = (\mathbf{D}\dot{\mathbf{D}}\ddot{\mathbf{D}}), \quad (6)$$

или в координатной форме

$$\mu\dot{\mu} = \dot{D}_1\ddot{D}_1 + \dot{D}_2\ddot{D}_2 + \dot{D}_3\ddot{D}_3, \quad \mu^3\kappa = \begin{vmatrix} D_1 & D_2 & D_3 \\ \dot{D}_1 & \dot{D}_2 & \dot{D}_3 \\ \ddot{D}_1 & \ddot{D}_2 & \ddot{D}_3 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Основные уравнения прямых методов определения орбит

Уравнения метода Лапласа

Опишем предложенный Лапласом метод в терминологии гелиоцентрического движения.

Рассмотрим рис. 2, на котором представлено взаимное положение Солнца S , Земли E и небесного тела A (обычно астероида или кометы) в некоторый момент времени \bar{t} . Очевидно, гелиоцентрические радиусы-векторы небесного тела \mathbf{r} и Земли \mathbf{g} связаны с геоцентрическим положением небесного тела \mathbf{d} уравнением

$$\mathbf{r} = \mathbf{g} + \mathbf{d}. \quad (8)$$

Предположим, что в эпоху \bar{t} нам известны геоцентрическое направление на A и его первые и вторые производные по времени, т. е. шесть величин $\alpha, \delta, \dot{\alpha}, \dot{\delta}, \ddot{\alpha}, \ddot{\delta}$, или, что эквивалентно, девять величин — ко-

ординат векторов $\mathbf{D}, \dot{\mathbf{D}}, \ddot{\mathbf{D}}$. Условие единичности вектора \mathbf{D} накладывает на рассматриваемые векторы три связи:

$$\mathbf{D}^2 = 1, \quad \mathbf{D}\dot{\mathbf{D}} = 0, \quad \dot{\mathbf{D}}^2 + \mathbf{D}\ddot{\mathbf{D}} = 0, \quad (9)$$

так что из трех компонент каждого из них независимы только две.

Дифференцируя (8) по времени два раза, придем к системе

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= d\mathbf{D} + \mathbf{g}, \\ \dot{\mathbf{r}} &= \dot{d}\mathbf{D} + d\dot{\mathbf{D}} + \dot{\mathbf{g}}, \\ \ddot{\mathbf{r}} &= \ddot{d}\mathbf{D} + 2\dot{d}\dot{\mathbf{D}} + d\ddot{\mathbf{D}} + \ddot{\mathbf{g}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Мы предполагаем, что движение небесного тела происходит только под действием притяжения Солнца, так что

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\kappa^2 \frac{\mathbf{r}}{r^3}, \quad (11)$$

где κ^2 — гравитационный параметр Солнца (произведение его массы на постоянную тяготения). Подставляя (11) в третье из уравнений (10) и заменяя в нем \mathbf{r} согласно первому из уравнений (10), получим систему уравнений метода Лапласа

$$\begin{aligned} \mathbf{D}d &= \mathbf{r} - \mathbf{g}, \\ \dot{\mathbf{D}}d + \mathbf{D}\dot{d} &= \dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{g}}, \\ \left(\ddot{\mathbf{D}} + \frac{\kappa^2}{r^3}\mathbf{D}\right)d + 2\dot{\mathbf{D}}\dot{d} + \mathbf{D}\ddot{d} &= -\frac{\kappa^2}{r^3}\mathbf{g} - \ddot{\mathbf{g}}. \end{aligned} \quad (12)$$

В скалярной форме система (12) представляет собой девять уравнений с девятью неизвестными: по три компоненты векторов $\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, \ddot{\mathbf{r}}$, а также геоцентрическое расстояние и его производные d, \dot{d}, \ddot{d} . Векторы $\mathbf{D}, \dot{\mathbf{D}}, \ddot{\mathbf{D}}, \mathbf{g}, \dot{\mathbf{g}}, \ddot{\mathbf{g}}$ считаются известными. Однако переходить к скалярной форме не следует: гораздо легче оперировать тремя векторными уравнениями.

Первые два из уравнений (12) линейны, в третьем нелинейность входит лишь через скалярный множитель $r^{-3} = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{-3/2}$. Поэтому решение уравнений не слишком сложная задача. Заметим, что величины $\mathbf{D}, \dot{\mathbf{D}}, \ddot{\mathbf{D}}$ легко могут быть выражены через α, δ и их производные.

Уравнения метода параметров видимого движения

Метод Лапласа имеет дело с векторами $\mathbf{D}, \dot{\mathbf{D}}, \ddot{\mathbf{D}}$, из которых только один единичный и только два взаимно ортогональны, а при вычислениях проектирует их на неподвижные оси x, y, z . С геометрической точки зрения естественнее оперировать ортонормированными векторами $\mathbf{T}, \mathbf{M}, \mathbf{D}$. И с астрономической точки зрения это лучше, так как разделяются величины первого порядка (зависящие от скоростей) и второго (зависящие от ускорений и определяемые со значительно меньшей точностью). Мы приходим к модификации метода Лапласа, получившей название метода параметров видимого движения. Заслуга его разработки и внедрения в практику астрономических наблюдений принадлежит А. А. Киселеву (главным образом) и О. П. Быкову [4]. В оригинальных работах уравнения метода ПВД выводились непосредственно. Однако несравненно проще вывести их преобразованием классических уравнений Лапласа (12), используя соотношения (4). После элементарных преобразований получаем

$$\begin{aligned} d\mathbf{D} &= \mathbf{r} - \mathbf{g}, \\ \dot{d}\mathbf{D} + \mu d\mathbf{T} &= \dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{g}}, \\ \left(\ddot{d} - \mu^2 d + \frac{\kappa^2}{r^3} d \right) \mathbf{D} + (\dot{\mu} d + 2\mu \dot{d}) \mathbf{T} + \varkappa \mu^2 d \mathbf{M} &= -\frac{\kappa^2}{r^3} \mathbf{g} - \ddot{\mathbf{g}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Определение параметров, входящих в основные уравнения, из наблюдений

Задача определения орбиты по направлению на объект и первым и вторым производным от направления в фиксированный момент времени является модельной. Обычно имеется ряд положений объекта на небесной сфере $\{\alpha_j, \delta_j\}$ в моменты времени t_j . Нужно по этому ряду получить значения $\{\alpha, \delta, \dot{\alpha}, \dot{\delta}, \ddot{\alpha}, \ddot{\delta}\}$ на некоторую среднюю эпоху \bar{t} . Задача эта хорошо разработана, и мы не будем на ней останавливаться. А дальше определяются координаты векторов $\mathbf{D}, \dot{\mathbf{D}}, \ddot{\mathbf{D}}$ или параметры видимого движения $\mu, \dot{\mu}, \varkappa$ (замечательно, что величины $\psi, \dot{\psi}$ не входят в уравнения (13)).

Вместо ряда сферических координат $\{\alpha_j, \delta_j\}$ можно использовать ряд направляющих косинусов $\{D_{1j}, D_{2j}, D_{3j}\}$. Их независимая аппроксимация приводит к нарушению связей (9). От этой неприятно-

сти легко избавиться, подправляя полученные значения при условии минимума квадрата поправки. Таким образом, значения параметров уравнений (12) можно считать известными.

Переходим к уравнениям (13) метода ПВД. Входящие в них величины $\mu, \dot{\mu}, \varkappa$ можно вычислить по формулам

$$\begin{aligned}\mu &= \sqrt{\dot{\alpha}^2 \cos^2 \delta + \dot{\delta}^2}, \\ \mu \dot{\mu} &= \dot{\alpha} \ddot{\alpha} \cos^2 \delta + \dot{\delta} \ddot{\delta} - \dot{\alpha}^2 \dot{\delta} \cos \delta \sin \delta, \\ \mu^3 \varkappa &= (\dot{\alpha} \ddot{\delta} - \ddot{\alpha} \dot{\delta}) \cos \delta + \dot{\alpha}^3 \cos^2 \delta \sin \delta + 2 \dot{\alpha} \dot{\delta}^2 \sin \delta\end{aligned}\quad (14)$$

или по более симметричным формулам

$$\begin{aligned}\mu &= \sqrt{\dot{D}_1^2 + \dot{D}_2^2 + \dot{D}_3^2}, \quad \mu \dot{\mu} = \dot{D}_1 \ddot{D}_1 + \dot{D}_2 \ddot{D}_2 + \dot{D}_3 \ddot{D}_3, \\ \mu^3 \varkappa &= \begin{vmatrix} D_1 & D_2 & D_3 \\ \dot{D}_1 & \dot{D}_2 & \dot{D}_3 \\ \ddot{D}_1 & \ddot{D}_2 & \ddot{D}_3 \end{vmatrix}.\end{aligned}\quad (15)$$

При описанном двуступенчатом вычислении $\mu, \dot{\mu}, \varkappa$ теряется значительная часть их преимуществ из-за потери точности. Если положение спутника (нормальное место в средний момент наблюдений) можно вычислить с точностью 10^{-6} и даже лучше, то скорости изменения направляющих косинусов — с точностью не выше 10^{-5} , а их вторые производные — не выше 10^{-2} . Поэтому целесообразнее находить ПВД непосредственно по массиву наблюдений. Достаточно аппроксимировать наблюденную траекторию наименее уклоняющимся (в смысле метода наименьших квадратов) от нее малым кругом. Радиус ϱ аппроксимирующего малого круга дает модуль геодезической кривизны

$$|\varkappa| = \frac{\sqrt{1 - \varrho^2}}{\varrho}.\quad (16)$$

Знак \varkappa положителен, если касательная к траектории на сфере вращается влево по курсу, если смотреть с конца вектора \mathbf{D} (и вправо по курсу для земного наблюдателя). Величины μ и $\dot{\mu}$ легко находятся по полиномиальной аппроксимации движения по малому кругу.

Решение уравнений

Пусть нам известны векторы $\mathbf{D}, \dot{\mathbf{D}}, \ddot{\mathbf{D}}$. Из первого уравнения (12), перенося \mathbf{g} влево и возводя в квадрат, получим

$$r^2 = C_0 + 2C_1d + d^2 \quad \text{при} \quad C_0 = g^2, \quad C_1 = \mathbf{gD}. \quad (17)$$

Умножим обе части третьего уравнения (12) скалярно на $\mathbf{D} \times \dot{\mathbf{D}}$. Поскольку смешанное произведение с двумя одинаковыми векторами равно нулю, получим после преобразований

$$Cd = C_2 + C_3r^{-3} \quad (18)$$

при

$$C = (\mathbf{D}\dot{\mathbf{D}}\ddot{\mathbf{D}}), \quad C_2 = -(\mathbf{D}\dot{\mathbf{D}}\ddot{\mathbf{g}}), \quad C_3 = -\kappa^2(\mathbf{D}\dot{\mathbf{D}}\mathbf{g}).$$

Соотношения (17, 18) представляют собой два алгебраических уравнения

$$r^2 = C_0 + 2C_1d + d^2, \quad Cd = C_2 + C_3r^{-3} \quad (19)$$

с двумя неизвестными r, d . Впервые эти уравнения выведены Лапласом.

Здесь мы рассмотрим только случай общего положения, когда

$$C = (\mathbf{D}\dot{\mathbf{D}}\ddot{\mathbf{D}}) \neq 0, \quad (20)$$

т. е. когда геодезическая кривизна не обращается в нуль и аппроксимирующий малый круг не вырождается в большой.

При выполнении (20) система (19) сводится к уравнению восьмой степени, за которое можно принять любое из соотношений

$$C^2r^8 + a_6r^6 + a_3r^3 + a_0 = 0, \quad (21)$$

$$C^2d^8 + b_7d^7 + b_6d^6 + \dots + b_0 = 0. \quad (22)$$

Здесь

$$\begin{aligned}
-a_6 &= C^2 C_0 + 2CC_1 C_2 + C_2^2, & -a_3 &= 2(C_2 + CC_1)C_3, & -a_0 &= C_3^2, \\
b_7 &= 2C(3CC_1 - C_2), \\
b_6 &= 3C^2 C_0 + 12C^2 C_1^2 - 12CC_1 C_2 + C_2^2, \\
b_5 &= 2(6C^2 C_0 C_1 + 4C^2 C_1^3 - 3CC_0 C_2 - 12CC_1^2 C_2 + 3C_1 C_2^2), \\
b_4 &= 3C^2 C_0^2 + 12C^2 C_0 C_1^2 - 24CC_0 C_1 C_2 - 16CC_1^3 C_2 + 3C_0 C_2^2 + 12C_1^2 C_2^2, \\
b_3 &= 2(3C^2 C_0^2 C_1 - 3CC_0^2 C_2 - 12CC_0 C_1^2 C_2 + 6C_0 C_1 C_2^2 + 4C_1^3 C_2^2), \\
b_2 &= C^2 C_0^3 - 12CC_0^2 C_1 C_2 + 3C_0^2 C_2 + 12C_0 C_1^2 C_2^2, \\
b_1 &= 2(-CC_0^3 C_2 + 3C_0^2 C_1 C_2^2), \\
b_0 &= C_0^3 C_2^2 - C_3^2.
\end{aligned}$$

Опишем алгоритм определения r, d .

Первый способ. Находим r , решая уравнение (21). Затем получаем d , используя второе уравнение (19):

$$d = \frac{C_2 r^3 + C_3}{Cr^3}. \quad (23)$$

Второй способ. Находим d , решая уравнение (22). Затем получаем r , используя первое уравнение (19):

$$r = \sqrt{C_0 + 2C_1 d + d^2}. \quad (24)$$

При программировании задачи лучше использовать оба описанных способа.

Замечание. Уравнение восьмой степени может иметь до восьми вещественных корней. Из них оставляем только те, для которых $r > 0, d > 0$. Можно показать, что таких корней не может быть больше трех. Более того, мы можем отбросить заведомо лишние решения. Для астероидов, например, r должно быть порядка нескольких астрономических единиц. Для ИСЗ d должно лежать между сотней километров и сотней мегаметров. Обычно получается одно приемлемое решение, но иногда их все же несколько и нужны дополнительные наблюдения для выбора реальной орбиты.

Дальнейший алгоритм определения орбиты прост. Умножая третье уравнение (12) скалярно на $\mathbf{D} \times \ddot{\mathbf{D}}$, найдем \dot{d} :

$$\dot{d} = \frac{1}{2C} \left[\frac{\kappa^2}{r^3} (\mathbf{D} \ddot{\mathbf{D}} \mathbf{g}) + (\mathbf{D} \ddot{\mathbf{D}} \mathbf{g}) \right]. \quad (25)$$

Теперь из первого и второго уравнений (12)

$$\mathbf{r} = \mathbf{g} + \mathbf{D}d, \quad \dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{g}} + \dot{\mathbf{D}}d + \mathbf{D}\dot{d}. \quad (26)$$

Формулы (26) полностью решают задачу.

Перейдем к уравнениям (13). Теперь известны векторы $\mathbf{D}, \mathbf{T}, \mathbf{M}, \mathbf{g}, \ddot{\mathbf{g}}$ и скаляры $\mu, \dot{\mu}, \varkappa$. Первые уравнения (12) и (13) совпадают, поэтому соотношение (17) остается справедливым при тех же значениях C_0, C_1 . Умножим обе части третьего уравнения (13) скалярно на $\mathbf{T} \times \mathbf{D}$. Поскольку смешанное произведение с двумя одинаковыми векторами равно нулю, получим после преобразований уравнение (18) при

$$C = \varkappa\mu^2, \quad C_2 = (\mathbf{T}\mathbf{D}\ddot{\mathbf{g}}), \quad C_3 = \kappa^2(\mathbf{T}\mathbf{D}\mathbf{g}).$$

Мы пришли к тем же уравнениям Лапласа (19), выражения для коэффициентов C, C_2, C_3 которых несколько изменились. Теперь условие невырожденности (20) принимает форму

$$\varkappa\mu^2 \neq 0. \quad (27)$$

Если (27) выполнено, дальнейший алгоритм решения системы (19) практически совпадает с описанным в предыдущем параграфе. Нужно лишь соотношения (25, 26) заменить на

$$\dot{d} = -\frac{1}{2\mu} \left[\frac{\kappa^2}{r^3}(\mathbf{M}\mathbf{D}\mathbf{g}) + (\mathbf{M}\mathbf{D}\ddot{\mathbf{g}}) + \dot{\mu}d \right], \quad (28)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{g} + d\mathbf{D}, \quad \dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{g}} + \mu d\mathbf{T} + \dot{d}\mathbf{D}. \quad (29)$$

Обратим внимание, что в методе Лапласа формула (25) содержит в знаменателе $\varkappa\mu^2$, а в методе ПВД формула (28) содержит в знаменателе только μ .

Круговая орбита

Как уже отмечалось, необходимые для вычисления орбиты параметры второго порядка ($\ddot{\mathbf{D}}, \dot{\mu}, \varkappa$) на короткой дуге определяются с недостаточной точностью. Поэтому имеет смысл задача определения круговой орбиты, не требующей их знания. Между тем околокруговые движения весьма распространены как среди естественных, так и среди искусственных небесных тел.

Предположим, что небесное тело описывает круговую орбиту $r = \text{const.}$ Связь (17) между r и d остается в силе. Для получения еще одной связи перепишем (17) в виде

$$r^2 = (\mathbf{g} + \mathbf{D}d)^2. \quad (30)$$

Введем обозначения

$$c_1 = \mathbf{D}\dot{\mathbf{g}}, \quad c_2 = \dot{\mathbf{D}}\mathbf{g}, \quad c_3 = \mathbf{g}\dot{\mathbf{g}}, \quad c_4 = \dot{\mathbf{D}}^2, \quad c_5 = \dot{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{g}}, \quad c_6 = \dot{\mathbf{g}}^2.$$

Продифференцируем (30) с учетом $\dot{r} = 0$:

$$(C_1 + d)\dot{d} + (c_1 + c_2)d + c_3 = 0. \quad (31)$$

Во втором уравнении (12) перенесем $\dot{\mathbf{g}}$ налево и возведем обе части в квадрат. На круговой орбите

$$\dot{\mathbf{r}}^2 = \frac{\kappa^2}{r}, \quad (32)$$

поэтому

$$\kappa^2/r = c_6 + 2c_5d + c_4d^2 + 2c_1\dot{d} + \dot{d}^2. \quad (33)$$

Умножим обе части (33) на $(C_1 + d)^2$ и выразим \dot{d} через d согласно (31):

$$\begin{aligned} \frac{\kappa^2(C_1 + d)^2}{r} &= (c_6 + 2c_5d + c_4d^2)(C_1 + d)^2 + [(c_1 + c_2)d + c_3]^2 - \\ &- 2c_1(C_1 + d)[(c_1 + c_2)d + c_3] = c_4d^4 + \bar{c}_3d^3 + \dots + \bar{c}_0, \end{aligned}$$

где

$$\bar{c}_3 = 2(C_1c_4 + c_5), \quad \bar{c}_1 = 2[C_1^2c_5 + C_1(-c_1^2 - c_1c_2 + c_6) + c_2c_3],$$

$$\bar{c}_2 = C_1^2c_4 + 4C_1c_5 - c_1^2 + c_2^2 + c_6, \quad \bar{c}_0 = C_1^2c_6 - 2C_1c_1c_3 + c_3^2.$$

Квадрат левой части в силу (17) равен $\kappa^4(C_1 + d)^4/(C_0 + 2C_1d + d^2)$.

Окончательно, получаем уравнение десятой степени с одной неизвестной d

$$c_4^2d^{10} + h_9d^9 + \dots + h_0 = 0, \quad (34)$$

где

$$\begin{aligned}
h_9 &= 2C_1 c_4^2 + 2\bar{c}_3 c_4, \\
h_8 &= C_0 c_4^2 + 4C_1 \bar{c}_3 c_4 + c_4^2, \\
h_7 &= 2C_0 \bar{c}_3 c_4 + 2C_1 (\bar{c}_3^2 + 2\bar{c}_2 c_4) + 2(\bar{c}_1 c_4 + \bar{c}_2 \bar{c}_3), \\
h_6 &= C_0 (\bar{c}_3^2 + 2\bar{c}_2 c_4) + 4C_1 (\bar{c}_1 c_4 + \bar{c}_2 \bar{c}_3) + \bar{c}_2^2 + 2\bar{c}_0 c_4 + 2\bar{c}_1 \bar{c}_3, \\
h_5 &= 2C_0 (\bar{c}_1 c_4 + \bar{c}_2 \bar{c}_3) + 2C_1 (\bar{c}_2^2 + 2\bar{c}_0 c_4 + 2\bar{c}_1 \bar{c}_3) + 2(\bar{c}_0 \bar{c}_3 + \bar{c}_1 \bar{c}_2), \\
h_4 &= C_0 (\bar{c}_2^2 + 2\bar{c}_0 c_4 + 2\bar{c}_1 \bar{c}_3) + 4C_1 (\bar{c}_0 \bar{c}_3 + \bar{c}_1 \bar{c}_2) + \bar{c}_1^2 + 2\bar{c}_0 \bar{c}_2 - \kappa^4, \\
h_3 &= 2C_0 (\bar{c}_0 \bar{c}_3 + \bar{c}_1 \bar{c}_2) + 2C_1 (\bar{c}_1^2 + 2\bar{c}_0 \bar{c}_2) + 2\bar{c}_0 \bar{c}_1 - 4C_1 \kappa^4, \\
h_2 &= C_0 (\bar{c}_1^2 + 2\bar{c}_0 \bar{c}_2) + 4C_1 \bar{c}_0 \bar{c}_1 + \bar{c}_0^2 - 6C_1^2 \kappa^4, \\
h_1 &= 2C_0 \bar{c}_0 \bar{c}_1 + 2C_1 \bar{c}_0^2 - 4C_1^3 \kappa^4, \\
h_0 &= C_0 \bar{c}_0^2 - C_1^4 \kappa^4.
\end{aligned} \tag{35}$$

Итак, задача сведена к решению уравнения десятой степени. По поводу возможного существования посторонних корней см. замечание на с. 112. Может встретиться и противоположная ситуация отсутствия корней, лежащих в допустимых границах (расстояние в метр или парсек, например, не годится для астероида, а расстояние в метр или астрономическую единицу — для ИСЗ). Это означает, что движение не может быть представлено круговой орбитой.

После нахождения d алгоритм определения орбиты тривиален. В силу (31)

$$\dot{d} = -\frac{(c_1 + c_2)d + c_3}{C_1 + d}, \tag{36}$$

если

$$C_1 + d \neq 0. \tag{37}$$

Теперь первые два соотношения (12) дают искомые $\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}$:

$$\mathbf{r} = \mathbf{g} + \mathbf{D} d, \quad \dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{g}} + \dot{\mathbf{D}} d + \mathbf{D} \dot{d}. \tag{38}$$

Задача определения круговой орбиты решена при выполнении условия невырожденности (37).

Определение круговой орбиты по методу ПВД осуществляется по вышеописанному алгоритму, в котором коэффициенты C_0, C_1 имеют те же значения, а три из коэффициентов c_k выражаются по модифицированным формулам:

$$c_2 = \mu \mathbf{T} \mathbf{g}, \quad c_4 = \mu^2, \quad c_5 = \mu \mathbf{T} \dot{\mathbf{g}}.$$

Расстояние d находится решением того же уравнения (34), а скорость его изменения \dot{d} находится по той же формуле (36). Формулы (38) для положения и скорости следует заменить на

$$\mathbf{r} = \mathbf{g} + d\mathbf{D}, \quad \dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{g}} + \mu d\mathbf{T} + \dot{d}\mathbf{D}. \quad (39)$$

Заключение

Подведем итоги.

Мы показали, как определять орбиту нового астероида или кометы по скудному набору наблюдений. Даже по наблюдениям одной ночи (несколько часов), когда в нашем распоряжении оказываются лишь видимое положение и видимая скорость, можно определить поисковую круговую орбиту. Конечно, для комет круговое приближение не подходит, но комету потерять труднее, чем астероид, так что через несколько дней определить ее орбиту не составит большого труда.

Рассмотренные методы имеют существенно бóльшую область применимости. Ими решаются почти без изменения алгоритмов по крайней мере еще две задачи.

1. *Определение орбиты ИСЗ по наблюдениям в обсерватории, расположенной на поверхности Земли.*

Эта задача приводит к тем же уравнениям, если считать S центром Земли, E — расположенной на ее поверхности обсерваторией, A — искусственным спутником Земли (рис. 2). Тогда вектор \mathbf{r} будет соответствовать геоцентрическому радиусу-вектору ИСЗ, \mathbf{g} — геоцентрическому радиусу-вектору обсерватории, \mathbf{d} — топоцентрическому радиусу-вектору ИСЗ. Отличие от рассмотренной выше задачи определения движения обращающихся вокруг Солнца объектов заключается, во-первых, в значении гравитационного параметра Земли и, во-вторых, в том, что обсерватория описывает вокруг полярной оси Земли отнюдь не кеплеров эллипс. Но этим свойством мы нигде не пользовались.

2. *Определение орбиты ИСЗ по наблюдениям класса спутник — спутник.*

Здесь S — центр Земли, E — спутник-наблюдатель, орбита которого известна, A — неизвестный спутник, орбиту которого требуется определить. Тогда вектор \mathbf{r} будет соответствовать геоцентрическому радиусу-вектору неизвестного ИСЗ, \mathbf{g} — геоцентрическому радиусу-вектору спутника-наблюдателя, \mathbf{d} — вектору, идущему от спутника-

наблюдателя к неизвестному спутнику. Единственное отличие от задачи определения движения обращающихся вокруг Солнца объектов заключается в значении гравитационного параметра Земли.

Более подробное освещение вопроса читатель сможет найти в книге [5], которая выйдет в свет в 2013 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным направлениям (грант 6.37.110.2011) и РФФИ (грант 11-02-00232-а).

Библиографические ссылки

1. *Погорелов А. В.* Лекции по дифференциальной геометрии. — Харьков : Изд-во Харьков. ун-та, 1961. — С. 166.
2. *Новиков С. П., Фоменко А. Т.* Элементы дифференциальной геометрии и топологии. — М.: Наука, 1987. — С. 432.
3. *Рашевский П. К.* Курс дифференциальной геометрии. — М.: ЛКИ, 2008. — С. 432.
4. *Киселев А. А., Быков О. П.* Определение орбиты спутника по одной фотографии со многими экспозициями // Астрон. журн. — 1973. — Т. 50, № 6. — С. 1298—1308.
5. *Быков О. П., Холшевников К. В.* Прямые методы определения орбит небесных тел. — СПб. : Изд-во СПбГУ, 2013. — С. 150 (в печати).

МОДЕЛЬ ВЕКОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕТНЫХ ОРБИТ

Представлен метод построения модели эволюции элементов орбит планет Солнечной системы в численно-аналитическом виде.

The method to construct the semianalytical model of the evolution of the elements of the Solar system planets orbits is presented.

Постановка задачи

Первая модель вековых возмущений планетных орбит была построена Жозефом Луи де Лагранжем. В разложении возмущающей функции задачи присутствует лишь вековая часть, в которой отброшены все слагаемые, пропорциональные эксцентриситетам и углам наклонов небесных тел, возведенным в третью и более высокие степени. Большие полуоси орбит являются постоянными величинами.

В середине XX в. такой подход был дополнен решением Д. Брауэра и А. Г. Вуркома [1], учитывающим соизмеримость средних движений Юпитера и Сатурна.

Авторы работы [2] применили метод канонических преобразований и существенно улучшили этот результат: эмпирические соотношения были заменены аналитически обоснованными формулами. Выводы, сделанные Лагранжем, получили подтверждение: эксцентриситеты и углы наклонов планетных орбит изменяются периодическим образом и остаются малыми на любых интервалах времени.

Э. Д. Кузнецов и К. В. Холшевников [3] получили гамильтониан двупланетной задачи с точностью до второго порядка малости относительно малого параметра, отношения массы Юпитера к массе Солнца. Гамильтониан содержит члены, пропорциональные эксцентриситетам и синусам половинных углов наклонов, возведенных в степени, от первой до шестой. Модель была использована для исследования эволюции системы Солнце — Юпитер — Сатурн. Было получено численное решение осредненной задачи на промежутке

времени, равном десяти миллиардам лет. Основной вывод: в рассматриваемой модели эксцентриситеты и углы наклонов орбит планет сохраняют малые значения и не испытывают резких изменений.

В цитированных работах численным методом исследовалась «эволюционная» система дифференциальных уравнений [4]. Правые части осредненных уравнений движения не содержат «быстрых» переменных, то есть средних аномалий планет. Численное интегрирование таких дифференциальных уравнений выполняют с большим шагом, порядка сотен лет. М. А. Вашковьяк [5], М. А. Вашковьяк и Н. М. Тесленко [6, 7] применили этот метод для исследования эволюции орбит далеких спутников планет.

Подробный обзор как методов построения моделей движения планет Солнечной системы, так и результатов расчетов дан в статье К. В. Холшевникова и Э. Д. Кузнецова [8].

В статье [9] было предложено другое решение вычислительных проблем. В качестве основы представления возмущающей функции использовано элементарное слагаемое, для которого определены алгоритмы сложения, умножения, интегрирования и дифференцирования. Показано, что в результате применения этих операций внешний вид элементарного слагаемого не меняется.

На основе подхода, предложенного в работе [9], решены следующие задачи:

- получено разложение обратного расстояния между планетами в буквенном виде как функция кеплеровских элементов орбит;
- для каждой планеты получены осредненный гамильтониан и функция преобразования для определения короткопериодических неравенств;
- выполнено численное интегрирование системы 48 осредненных дифференциальных уравнений первого порядка на большом интервале времени;
- исходные тексты вычислительных процедур, выполняемые модули программ, текстовые наборы данных и результаты вычислений в графическом виде представлены на интернет-ресурсе.

Обратное расстояние

В модели движения больших планет Солнечной системы на первом этапе необходимо выполнить разложение обратного расстояния между планетами.

Пусть

x, y, z и x', y', z' — прямоугольные координаты двух планет в относительной системе отсчета;

$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ и $r' = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}$ — расстояния планет от центральной точки;

$\Delta = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2}$ — расстояние между планетами.

Пусть справедливо неравенство $r < r'$, тогда обратное расстояние между планетами можно представить в виде суммы

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{1}{r'} + \frac{1}{r'} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r'} \right)^k P_k \left(\frac{x}{r} \frac{x'}{r'} + \frac{y}{r} \frac{y'}{r'} + \frac{z}{r} \frac{z'}{r'} \right), \quad (1)$$

где $P_k(x)$ — полином Лежандра порядка k . Верхний предел суммы, равный бесконечности, следует заменить некоторым конечным числом J .

Кеплеровские элементы орбиты: большая полуось a , эксцентриситет e , угол наклона i , средняя аномалия l — относятся к первой планете, штрих отличает аналогичные параметры для второй планеты. При разложении обратного расстояния вместо долготы восходящего узла Ω и аргумента перицентра ω будут использованы угловые переменные h и g , смещенные на четверть круга:

$$h = \Omega - \frac{\pi}{2}, \quad g = \omega + \frac{\pi}{2},$$

а синус угла наклона будет обозначен $s = \sin i$.

Величины e и s , характеризующие орбиту каждой из планет, будем считать *малыми параметрами*. Разложение обратного расстояния будет получено с точностью до *десятой степени* относительно этих величин.

Рассмотрим два вида элементарного слагаемого:

$$\begin{aligned} & A_c \cdot a^{i_1} a'^{i_2} e^{i_3} e'^{i_4} s^{i_5} s'^{i_6} \cdot \cos \vartheta, \\ & A_s \cdot a^{i_1} a'^{i_2} e^{i_3} e'^{i_4} s^{i_5} s'^{i_6} \cdot \sin \vartheta, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\vartheta = j_1 l + j_2 g + j_3 h + j_4 l' + j_5 g' + j_6 h',$$

A_c и A_s — числовые значения амплитуды, показатели степени i_1, \dots, i_6 и индексы j_1, \dots, j_6 могут принимать целые положительные и отрицательные значения и нуль.

Условие, ограничивающее точность вычислений относительно *малых величин* целым положительным числом I , принимает вид

$$i_3 + i_4 + i_5 + i_6 \leq I.$$

Выделим в формуле (1) начальные составляющие и представим их как сумму элементарных слагаемых. Далее, используя алгоритмы сложения и умножения элементарных слагаемых, найдем формулы для рекуррентного вычисления всего выражения.

Член суммы (1), имеющий порядок k , запишем следующим образом:

$$\frac{1}{r'} \left(\frac{r}{r'} \right)^k P_k (\cos \Phi), \quad (3)$$

где

$$\cos \Phi = \frac{x}{r} \frac{x'}{r'} + \frac{y}{r} \frac{y'}{r'} + \frac{z}{r} \frac{z'}{r'}. \quad (4)$$

Обозначая

$$B_k = \frac{1}{r'} \left(\frac{r}{r'} \right)^k,$$

получим начальные выражения

$$B_0 = \frac{1}{r'},$$

$$B_1 = B_0 \left(\frac{r}{r'} \right)$$

и рекуррентную формулу

$$B_k = B_{k-1} \left(\frac{r}{r'} \right). \quad (5)$$

Начальные выражения и рекуррентная формула для полиномов Лежандра имеют вид

$$P_0 (\cos \Phi) = 1,$$

$$P_1 (\cos \Phi) = \cos \Phi,$$

$$P_k (\cos \Phi) = \frac{2k-1}{k} \cos \Phi P_{k-1} (\cos \Phi) - \frac{k-1}{k} P_{k-2} (\cos \Phi). \quad (6)$$

Для функций Бесселя справедливо разложение

$$J_k(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!(n-k)!} \left(\frac{x}{2} \right)^{2n+k}.$$

Пусть v — истинная аномалия. С помощью функций Бесселя $J_k(x)$ с точностью до десятой степени относительно параметра e выполним разложения:

$$\begin{aligned}
\frac{r}{a} &= 1 + \frac{1}{2}e^2 + e \sum_{k=1}^{10} \frac{J_{k+1}(ke) - J_{k-1}(ke)}{k} \cos(kl), \\
\frac{a}{r} &= 1 + 2 \sum_{k=1}^{10} J_k(ke) \cos(kl), \\
\cos v &= -e + 2(1 - e^2) \sum_{k=1}^{11} \frac{J_k(ke)}{e} \cos(kl), \\
\sin v &= \sqrt{1 - e^2} \sum_{k=1}^{10} [J_{k-1}(ke) - J_{k+1}(ke)] \sin(kl).
\end{aligned} \tag{7}$$

Начальные выражения (7) представляют собой ряды, состоящие из элементарных слагаемых вида (2).

На основе формул кеплеровского движения получим

$$\begin{aligned}
\frac{x}{r} &= \frac{1 + \cos i}{2} \cos(v + g + h) - \frac{1 - \cos i}{2} \cos(v + g - h), \\
\frac{y}{r} &= \frac{1 + \cos i}{2} \sin(v + g + h) + \frac{1 - \cos i}{2} \sin(v + g - h), \\
\frac{z}{r} &= -s \cos(v + g).
\end{aligned} \tag{8}$$

С точностью до десятой степени относительно параметров e и s запишем

$$\begin{aligned}
\sqrt{1 - e^2} &= 1 - \frac{1}{2}e^2 - \frac{1}{8}e^4 - \frac{1}{16}e^6 - \frac{5}{128}e^8 - \frac{7}{256}e^{10}, \\
\cos i &= 1 - \frac{1}{2}s^2 - \frac{1}{8}s^4 - \frac{1}{16}s^6 - \frac{5}{128}s^8 - \frac{7}{256}s^{10}.
\end{aligned} \tag{9}$$

При помощи разложений (7) и (9) вычислим начальные выражения (8). После этого с помощью операций умножения и сложения, выполняемыми над элементарными слагаемыми, составим сумму (4). Начальные выражения, необходимые для проведения рекурсии по формулам (5) и (6), являются рядами, состоящими из слагаемых вида (2) (табл. 1).

Таблица 1. **Большие планеты: начальные выражения**

I	r/a	a/r	$\cos v$	$\sin v$	x/r	y/r	z/r	$\cos \Phi$
4	7	8	10	9	98	98	14	162
8	21	22	26	25	462	462	42	2 248
10	31	32	37	36	682	682	62	5 955

В формуле (1) каждый член порядка k образован произведением двух рядов, составляющих соответственно функции B_k и $P_k(\cos \Phi)$. С ростом k число слагаемых увеличивается. Для ограничения числа слагаемых в алгоритме использован следующий прием: с ростом k значение числа I , регулирующего точность вычислений, убывает. Таблица 2 содержит сведения о количестве слагаемых для некоторых значений числа k .

Таблица 2. **Большие планеты: разложение обратного расстояния**

k	2	4	6	12	16	27
I	10	8	8	6	4	4
B_k	481	250	254	110	38	38
$P_k(\cos \Phi)$	7 216	8 171	14 853	8 572	2 015	3 487
$B_k \times P_k(\cos \Phi)$	13 763	11 534	18 886	9 184	2 083	3 487

Следует заметить, что начальные выражения, а также ряды для величин B_k , $P_k(\cos \Phi)$ и произведения $B_k \times P_k(\cos \Phi)$ справедливы для любой пары планет.

Пертурбационная функция

В относительной системе отсчета (начало координат в центре Солнца с массой m_0) для каждой возмущаемой планеты с номером i и массой m_i функцию, обусловленную возмущающими планетами, запишем в виде

$$R_i = f \sum_{j=1}^N m_j \left[\frac{1}{\Delta_{ij}} - \frac{1}{r_j} \frac{r_i}{r_j} \cos \Phi_{ij} \right] - f \sum_{j=1}^{i-1} m_j \frac{1}{r_i}, \quad (j \neq i), \quad (10)$$

где f — гравитационная постоянная; m_j — масса планеты; N — общее число планет; r_i, r_j — расстояния планет от центрального тела; $r_i < r_j$ при $i < j$; Δ_{ij} — расстояние между планетами, причем $j \neq i$.

Если $r_i < r_j$, то первое слагаемое в разложении обратного расстояния (1) не принимается во внимание, а второй член ряда (1) взаимно сокращается с косвенным слагаемым в (10).

Если $r_j < r_i$, то разложение обратного расстояния выполняется относительно r_j/r_i , косвенная часть в (10) по абсолютной величине превосходит второе слагаемое разложения (1), а первое слагаемое ряда (1) для всех $j < i$ учитывают прибавлением к выражению

$$f(m_0 + m_i)/r_i$$

величины $f m_j/r_i$ и вычитанием этой величины в выражении (10).

Промежуточный потенциал в относительной системе отсчета имеет вид

$$U_i = \frac{f \left(m_0 + \sum_{j=1}^i m_j \right)}{r_i}. \quad (11)$$

Промежуточному потенциалу U_i соответствует промежуточная кеплеровская орбита планеты с номером i . Среднее движение n_i промежуточной орбиты связано с большой полуосью a_i формулой

$$n_i^2 a_i^3 = f \left(m_0 + \sum_{j=1}^i m_j \right). \quad (12)$$

Зависимость канонических элементов L_i, G_i, H_i от большой полуоси, эксцентриситета e_i и угла наклона i_i орбиты дана соотношениями

$$L_i = \sqrt{f \left(m_0 + \sum_{j=1}^i m_j \right)}, \quad G_i = L_i \sqrt{1 - e_i^2}, \quad H_i = G_i \cos i_i. \quad (13)$$

Гамильтониан промежуточной орбиты K_i и частная производная от этой величины по переменной действия L_i имеют вид

$$K_i = \frac{\left[f \left(m_0 + \sum_{j=1}^i m_j \right) \right]^2}{2 L_i^2}, \quad n_i = - \frac{\partial K_i}{\partial L_i}. \quad (14)$$

Промежуточная орбита характеризуется постоянными значениями параметров действия L_i , G_i , H_i и угловых величин g_i , h_i . Средняя аномалия l_i изменяется с частотой n_i .

В возмущенном движении все параметры орбиты являются переменными величинами.

В таблице 3 представлены результаты разложения пертурбационной функции для планет от Меркурия до Нептуна в ряды, представляющие собой суммы элементарных слагаемых (2). Буквенное разложение R_i , $i = 1, \dots, 8$, получено на основе алгоритма, описанного в предыдущем разделе.

Таблица 3. **Большие планеты: пертурбационная функция**

Номер планеты	Количество слагаемых
1	484 505
2	614 706
3	656 747
4	679 944
5	604 441
6	555 186
7	502 124
8	449 613

Значения возмущающих масс планет m_i в единицах массы Солнца и средние значения больших полуосей орбит планет a_i и a_j , измеряемые в астрономических единицах, были использованы только для оценки амплитуды каждого члена ряда (10). Слагаемые, амплитуда которых после умножения на соответствующий фактор превысила бы по модулю 10^{-16} , были включены в разложение. В таблице 3 дана общая сумма слагаемых для каждой планеты.

Осредненный гамильтониан

Для каждой планеты составляется *своя* возмущающая функция и *свои* уравнения возмущенного движения. В этих уравнениях частные производные от возмущающей функции R_i вычисляются только по элементам промежуточной орбиты *возмущаемой планеты*. Параметры движения *возмущающих планет*, от которых зависит возмущающая функция, при решении уравнений возмущенного движения следует рассматривать как функции времени.

При решении уравнений возмущенного движения в первом приближении достаточно выделить в каждом из рядов, полученных для пертурбационных функций R_i , вековые и долгопериодические слагаемые F_i , а оставшуюся часть, равную $R_i - F_i$, проинтегрировать по времени [4]. Величина F_i называется «осредненной» пертурбационной функцией.

Интеграл по времени от слагаемых (2) в силу уравнений промежуточного движения имеет вид

$$\begin{aligned} & + \frac{1}{j_1 n + j_4 n'} \cdot A_c \cdot a^{i_1} a'^{i_2} e^{i_3} e'^{i_4} s^{i_5} s'^{i_6} \cdot \sin \vartheta, \\ & - \frac{1}{j_1 n + j_4 n'} \cdot A_s \cdot a^{i_1} a'^{i_2} e^{i_3} e'^{i_4} s^{i_5} s'^{i_6} \cdot \cos \vartheta, \\ & \vartheta = j_1 l + j_2 g + j_3 h + j_4 l' + j_5 g' + j_6 h'. \end{aligned} \quad (15)$$

Период в годах для значений $j_1 \neq 0$ или $j_4 \neq 0$ равен

$$p = \frac{2\pi}{365.25 (j_1 n + j_4 n')}.$$

Функцию F_i составляют слагаемые, для которых выполняется одно из условий: значения индексов $j_1 = j_4 = 0$ или период p превышает 200 лет.

В случае равенства нулю значений индексов слагаемое называется вековым, при выполнении второго условия — долгопериодическим. Предельный период для короткопериодических членов, равный 200 годам, выбран так, чтобы его значение превышало период обращения самой дальней планеты Нептун. При таком выборе, например, члены, удовлетворяющие так называемому «большому неравенству» Венеры, попадают в осредненный гамильтониан.

Таблица 4 содержит данные о количестве слагаемых, составляющих осредненную пертурбационную функцию для всех возможных пар планет, и общую сумму слагаемых для каждой планеты.

Для каждой пары планет с точностью до десятого порядка относительно малых параметров условие $j_1 = j_4 = 0$ выполняется для 1729 вековых членов. Для остальных слагаемых обязательно выполнение условий $j_1 \neq 0$ и $j_4 \neq 0$.

В случае Меркурия и Марса осредненные функции, обусловленные возмущающим действием других планет, содержат только вековые слагаемые.

Таблица 4. Большие планеты: осредненный гамильтониан

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
1	—	1 729	1 729	1 729	1 729	1 729	1 729	1 729	12 103
2	1 729	—	1 755	1 729	1 729	1 729	1 729	1 729	12 129
3	1 729	1 755	—	1 729	1 729	1 729	1 729	1 729	12 129
4	1 729	1 729	1 729	—	1 729	1 729	1 729	1 729	12 103
5	1 729	1 729	1 729	1 729	—	2 775	2 147	1 729	13 567
6	1 729	1 729	1 729	1 729	2 827	—	5 745	3 559	19 047
7	1 729	1 729	1 729	1 729	2 199	6 169	—	8 110	23 394
8	1 729	1 729	1 729	1 729	1 729	3 767	8 652	—	21 064

Для пары Венера и Земля, например, осредненная возмущающая функция кроме вековых членов содержит 26 долгопериодических слагаемых. В этих слагаемых значение индекса $j_1 = 8$ относится к планете Венера, для планеты Земля индекс $j_4 = -13$.

Наибольшее число долгопериодических членов для пары Юпитер и Сатурн зависит от аргументов вида $2l_5 + j_2g_5 + j_3h_5 - 5l_6 + j_5g_6 + j_6h_6$.

Наибольшее число долгопериодических членов для пары Юпитер и Уран зависит от аргументов вида $l_5 + j_2g_5 + j_3h_5 - 7l_7 + j_5g_7 + j_6h_7$.

Наибольшее число долгопериодических членов для пары Сатурн и Уран зависит от аргументов вида $l_6 + j_2g_6 + j_3h_6 - 3l_7 + j_5g_7 + j_6h_7$.

Наибольшее число долгопериодических членов для пары Сатурн и Нептун зависит от аргументов вида $l_6 + j_2g_6 + j_3h_6 + j_4l_8 + j_5g_8 + j_6h_8$, где $j_4 = -5$ или $j_4 = -6$.

Индексы j_1 и j_4 долгопериодических слагаемых осредненной пертурбационной функции для пары планет-гигантов Уран и Нептун принимают значения $j_1 = 1$ и $j_4 = -2$, $j_1 = 2$ и $j_4 = -4$ или $j_1 = 3$ и $j_4 = -6$.

Величина R_i является функцией оскулирующих параметров орбиты, а функция F_i с точностью до *первого порядка* относительно малого параметра зависит от «сглаженных» элементов орбиты. «Сглаженные» параметры отличаются от оскулирующих на величину короткопериодических неравенств. Численное интегрирование *системы 48 осредненных дифференциальных уравнений первого порядка* при условии, что функция R_i заменена на «осредненную» возмущающую функцию F_i , позволяет получить **эволюцию** «сглаженных» параметров движения.

Эксцентриситеты и углы наклона орбит некоторых планет могут достигать очень малых значений. По этой причине численное интегрирование осредненных уравнений движения следует выполнять на основе несингулярных параметров:

$$a_i, \quad l_i + g_i + h_i, \quad e_i \cos(g_i + h_i), \quad e_i \sin(g_i + h_i), \quad s_i \cos h_i, \quad s_i \sin h_i. \quad (16)$$

Уравнения движения имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{da_i}{dt} &= \frac{\partial a_i}{\partial L_i} \frac{\partial F_i}{\partial l_i}, \\ \frac{d(l_i + g_i + h_i)}{dt} &= n_i - \frac{\partial F_i}{\partial L_i} - \frac{\partial F_i}{\partial G_i} - \frac{\partial F_i}{\partial H_i}, \\ \frac{d[e_i \cos(g_i + h_i)]}{dt} &= \frac{de_i}{dt} \cos(g_i + h_i) \\ &\quad + e_i \sin(g_i + h_i) \left(\frac{\partial F_i}{\partial G_i} + \frac{\partial F_i}{\partial H_i} \right), \\ \frac{d[e_i \sin(g_i + h_i)]}{dt} &= \frac{de_i}{dt} \sin(g_i + h_i) \\ &\quad - e_i \cos(g_i + h_i) \left(\frac{\partial F_i}{\partial G_i} + \frac{\partial F_i}{\partial H_i} \right), \\ \frac{d[s_i \cos h_i]}{dt} &= \frac{ds_i}{dt} \cos h_i + s_i \sin h_i \frac{\partial F_i}{\partial H_i}, \\ \frac{d[s_i \sin h_i]}{dt} &= \frac{ds_i}{dt} \sin h_i - s_i \cos h_i \frac{\partial F_i}{\partial H_i}, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{de_i}{dt} &= \frac{1}{2e_i} \left(\frac{\partial e_i^2}{\partial L_i} \frac{\partial F_i}{\partial l_i} + \frac{\partial e_i^2}{\partial G_i} \frac{\partial F_i}{\partial g_i} \right), \\ \frac{ds_i}{dt} &= \frac{1}{2s_i} \left(\frac{\partial s_i^2}{\partial G_i'} \frac{\partial F_i}{\partial g_i} + \frac{\partial s_i^2}{\partial H_i} \frac{\partial F_i}{\partial h_i} \right), \\ \frac{\partial F_i}{\partial L_i} &= \frac{\partial a_i}{\partial L_i} \frac{\partial F_i}{\partial a_i} + \frac{1}{2e_i} \frac{\partial e_i^2}{\partial L_i} \frac{\partial F_i}{\partial e_i}, \\ \frac{\partial F_i}{\partial G_i} &= \frac{1}{2e_i} \frac{\partial e_i^2}{\partial G_i} \frac{\partial F_i}{\partial e_i} + \frac{1}{2s_i} \frac{\partial s_i^2}{\partial G_i} \frac{\partial F_i}{\partial s_i}, \\ \frac{\partial F_i}{\partial G_i} &= \frac{1}{2s_i} \frac{\partial s_i^2}{\partial H_i} \frac{\partial F_i}{\partial s_i}. \end{aligned} \quad (18)$$

В произвольный момент времени надо знать *только числовые значения правых частей* «осредненных» уравнений в несингулярных переменных, поскольку эти уравнения будут проинтегрированы численным образом.

Результаты расчетов

Численное интегрирование осредненных уравнений движения в гелиоцентрической эклиптической системе отсчета было выполнено на интервале времени от момента 1 721 423.5 юлианских дней (полночь 1 января 1 года нашей эры) на 25 млн лет назад и на 25 млн лет вперед.

В таблице 5 представлены границы изменения сглаженных значений больших полуосей орбит планет на всем интервале численного интегрирования — 50 млн лет. Единицей измерения является астрономическая единица (а. е.).

Таблица 5. Границы изменения больших полуосей орбит

Значение	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Минимальное	5.2022	9.5415	19.1786	30.0563
Максимальное	5.2029	9.5499	19.2083	30.0935

Исходные тексты вычислительных процедур, выполняемые модули программ, текстовые наборы данных и результаты вычислений в графическом виде представлены на интернет-ресурсе (<http://vadimchazov.narod.ru/secequat.htm>).

Все вычисления были выполнены с помощью компилятора Free Pascal (<http://www.freepascal.org>), находящегося в свободном доступе.

Автор благодарен участникам и гостям семинара по небесной механике ГАИШ МГУ за многолетнее внимательное отношение к его докладам на заседаниях.

Библиографические ссылки

1. *Brouwer D., Woerkom A. G.* The secular variations of the orbital elements of the principal Planets // Astron. papers. — 1950. — Vol. 13. — P. 81.

2. Анолик М. В., Красинский Г. А., Пиус Л. Ю. Тригонометрическая теория вековых возмущений больших планет // Тр. ИТА АН СССР. — 1969. — Вып. 4. — С. 3.
3. Кузнецов Э. Д., Холшевников К. В. Разложение гамильтониана двупланетной задачи в ряд Пуассона по всем элементам: применение пуассоновского процессора // Астрон. вестн. — 2004. — Т. 38, вып. 2. — С. 171.
4. Лидов М. Л. Полуаналитические методы расчета движения спутников // Тр. ИТА АН СССР. — 1978. — Т. 17. — С. 54.
5. Вашковьяк М. А. Численно-аналитический метод исследования эволюции орбит далеких спутников планет // Письма в Астрон. журн. — 2005. — Т. 31, вып. 1. — С. 66.
6. Вашковьяк М. А., Тесленко Н. М. Эволюционные характеристики орбит внешних спутников Юпитера // Астрон. вестн. — 2008. — Т. 42, вып. 4. — С. 301.
7. Вашковьяк М. А., Тесленко Н. М. Эволюционные характеристики орбит внешних спутников Сатурна, Урана и Нептуна // Астрон. вестн. — 2008. — Т. 42, вып. 6. — С. 521.
8. Холшевников К. В., Кузнецов Э. Д. Обзор работ по орбитальной эволюции больших планет Солнечной системы // Астрон. вестн. — 2007. — Т. 41, вып. 4. — С. 291.
9. Герасимов И. А., Чазов В. В., Рыжлова Л. В., Тагаева Д. А. Построение теории движения тел Солнечной системы, основанной на универсальном методе вычисления возмущающей функции // Астрон. вестн. — 2000. — Т. 34, вып. 6. — С. 559.

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКИХ УГРОЗ: ПОИСК ОПАСНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Описаны некоторые разрабатываемые в настоящее время варианты систем космического базирования оптического диапазона. Представлена концепция экономичной и относительно быстро реализуемой системы на основе одного или двух малых космических аппаратов с телескопами малого или среднего класса.

В последние годы во многих странах начаты работы по созданию систем обнаружения и слежения за опасными небесными телами (ОНТ). Столкновение таких тел (астероидов и комет размером более 50 м) с Землей влечет за собой катастрофические последствия. Первоочередной задачей, поставленной прежде всего перед астрономами, является массовое обнаружение ОНТ. Для решения этой задачи в мире уже созданы системы наблюдательных средств наземного базирования. В последние годы также интенсивно разрабатываются системы космического базирования. Оба типа систем должны работать параллельно и дополнять друг друга.

Основное преимущество космических систем — возможность проводить наблюдения в гораздо большей области неба, в том числе объектов внутри орбиты Земли; отсутствие атмосферных ограничений по рабочим длинам волн приемников излучения; возможность круглосуточной работы. Канадский спутник NEOSSAT и немецкий Asteroid Finder являются первыми широко известными космическими проектами, реализуемыми в настоящее время. Диапазон предложений по новым проектам широк: от небольших инструментов, аналогичных упомянутому выше, до крупных (2 м) космических телескопов. В России ведется разработка проектов таких космических систем.

В лекции представлены астрономические характеристики, лежащие в основе технических требований, предъявляемых к таким системам. Обсуждаются:

- яркость (блеск) ОНТ и необходимая проникающая сила инструмента;

- характерные дальности и скорости ОНТ и время упреждения;
- время, необходимое для классификации орбиты астероида (кометы) как ОНТ;
- астрономические и технические ограничения на алгоритмы обзоров.

Описаны несколько разрабатываемых в настоящее время вариантов систем космического базирования оптического диапазона. Более подробно представлена концепция экономичной и относительно быстро реализуемой системы на основе одного или двух малых космических аппаратов с телескопами малого или среднего класса.

Д. А. Белей

Томский государственный университет

РАЗВИТИЕ ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ АСТЕРОИДОВ

В данной работе рассматривается развитие разработанной ранее прикладной программной системы для визуализации вероятностной орбитальной эволюции астероидов. Система предоставляет следующие функции:

- визуализацию движения планет и их траекторий;
- добавление собственных объектов в базу данных системы;
- визуализацию движения добавленного астероида, его траектории и тестовых частиц;
- масштабирование, изменение точки наблюдения и системы координат во время демонстрации движения;
- изменение скорости воспроизведения и переход на заданную пользователем дату.

По сравнению с предыдущей версией, реализованной в среде Delphi, были внесены следующие изменения. Система полностью перенесена в среду разработки Unity3D, а алгоритмы переписаны на язык C#. Интерфейс пользователя поддерживает два языка — русский и английский. Система перешла на полную поддержку текстового формата для хранения структурированных файлов xml. В xml файлах хранятся базы данных объектов, которые использует программа, координаты этих тел, рассчитанные пользователем, настройки интерфейса, а также параметры конкретного пользователя, использующего систему. Начальными данными для системы являются координаты астероида и тестовых частиц, которые вычисляются с помощью программного обеспечения, разработанного в НИИ ПММ ТГУ, а затем при помощи нашей программной системы переводятся в формат xml.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-31255 мол_а.

СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВЕЗДЫ HD 200775 В ФАЗЕ МАКСИМУМА АКТИВНОСТИ

Звезда HD 200775 — молодая переменная звезда, которая принадлежит к числу звезд Ве Хербига. Такие звезды отличаются фотометрической и спектральной переменностью. Это выражается в изменении интенсивностей и профилей линий. Особенно интересна в этом отношении яркая водородная линия H_α .

Согласно опубликованным в литературе данным эквивалентная ширина линии H_α в спектре звезды HD 200775 испытывает изменения с предположительным значением периода около четырех лет. В мае—июне 2012 г. предполагался максимум эквивалентной ширины линии H_α .

В ходе данной работы исследованы спектры высокого разрешения, полученные на 1.2-метровом телескопе Коуровской АО начиная с мая 2012 г. Выявлено, что эквивалентная ширина линии H_α соответствует значениям, характерным для предыдущих максимумов активности звезды. Составлены атлас и список линий оптического спектра звезды. Проведено исследование изменения профиля линии H_α и его отдельных компонент.

ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ОБОЛОЧЕК СВЕРХНОВЫХ

В работе численно рассматривается процесс столкновения оболочек сверхновых в межзвездной среде. Изучена динамика газа и тяжелых элементов при взаимодействии оболочек, находящихся на различных эволюционных фазах (от адиабатической до сильно радиационной). Исследованы статистические свойства распределения тяжелых элементов. Проведены оценки эффективности перемешивания в зависимости от эволюционной фазы оболочек.

НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ ВНОВЬ ОТКРЫТЫХ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Разработана методика определения орбит вновь открываемых небесных тел. Суть методики в следующем. Пусть имеются три или более наблюдений нового небесного тела. Выбираются два наблюдения (как правило, первое и последнее по времени, но возможны и другие варианты) и для них рассматриваются различные положения плоскости гелиоцентрической орбиты небесного тела, т. е. осуществляется перебор возможных значений двух элементов орбиты — наклона и долготы восходящего узла. Определяются точки пересечения векторов с этими плоскостями и вычисляются гелиоцентрические векторы положения тела. Фильтруя заведомо маловероятные орбиты (гелиоцентрические расстояния больше 100 а. е) и учитывая абберационное запаздывание, по двум гелиоцентрическим положениям и интервалу времени между ними классическим методом Гаусса определяются оставшиеся элементы орбиты. По этим полученным системам элементов вычисляются значения среднеквадратического уклонения «О-С». Системы элементов, имеющие наименьшие среднеквадратические уклонения «О-С», считаются наиболее вероятными для вновь открытого тела. Затем с учетом всех значимых возмущений полученные элементы улучшаются. Достоинством методики является универсальность (единообразный подход для различных типов орбит, длин наблюденной дуги и количества наблюдений). Результаты вычисления орбит ряда вновь открытых астероидов и комет показывают практическую применимость данного метода.

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ФОРЧУНА ДЛЯ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО

Диаграмма (мозаика) Вороного (ДВ) для конечного множества реперных точек — это способ разбиения плоскости на области, при котором любая точка на границе областей равноудалена от их реперных точек. С помощью идеологии ДВ можно строить подвижные разностные сетки для задач газодинамики, сохраняющие качество при сильных деформациях среды. Недостатками такого подхода являются трудоемкость построения ДВ и проблема бесконечности граничных областей.

В настоящей работе реализуется построение ДВ по экономичному алгоритму Форчуна. Приводится оценка погрешности метода.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ НОЧНОГО НЕБА, ПОЛУЧЕННОМУ НА ALLSKY-КАМЕРЕ

Наш опыт работы с системой контроля облачности Boltwood cloud sensor показал ее существенные недостатки: сильную зависимость показаний от температуры воздуха, нестабильность нуля-пункта, возможность оценивать состояние облачности только в небольшой области вблизи зенита.

Анализируя изображение ночного неба с allsky-камеры, можно получить данные о прозрачности атмосферы в видимом диапазоне. Критерием является видимость звезд на кадрах. Жесткая ориентация камеры позволяет существенно упростить отождествление объектов.

КЛАССИФИКАЦИЯ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД ПО МЕХАНИЗМУ АККРЕЦИИ

Осуществлена попытка классификации молодых звезд по типу аккреции. Для режима эжектора справедливо неравенство $R_l > R_G$, для режима пропеллера — $R_{st} > R_{co}$, для режима аккретора — $R_{st} < R_{co}$, для режима георотатора — $R_A > R_G$. Составлена сводная таблица основных параметров молодых звезд и проанализированы результаты. На основе вычислений можно сделать вывод, к какой категории можно отнести звезду с заданными начальными параметрами. Для примера взяли V1057 Cyg с определенными характеристиками: масса звезды $M = 2M_\odot$, индукция магнитного поля $B = 1$ кГс, радиус звезды $R = 2R_\odot$, темп аккреции $\dot{M} = 10^{-8} M_\odot/\text{год}$, период вращения $P_{\text{вр}} = 10$ дней. Звезда V1057 Cyg относится к пропеллерам.

**КОМПЛЕКС ПРОГРАММ
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОЛУЧЕНИЯ
И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КАЛИБРОВАЧНЫХ
ПЗС-КАДРОВ ТЕЛЕСКОПОВ СЕТИ МАСТЕР**

Точность фотометрии во многом определяется аккуратностью выполнения калибровок ПЗС-изображений. Даже небольшие вариации освещенности «плоского поля», особенно характерные для широкопольных телескопов, приводят к существенному ухудшению результатов. Очень остро эта проблема стоит при удаленных и автоматических наблюдениях, когда наблюдатель не имеет возможности непосредственно оценить качество материала.

Рассмотрены способы контроля качества кадров «плоского поля». Реализованы алгоритмы автоматической проверки на наличие неравномерной освещенности для кадров «плоского поля» и ошибок считывания ПЗС для всех калибровочных кадров.

Для обсерваторий сети МАСТЕР разработан комплекс программ, осуществляющих выборку, проверку и комбинирование калибровочных кадров. Программное обеспечение отлажено и успешно работает.

Работа выполнена при поддержке гранта в виде субсидии Министерства образования и науки РФ (соглашение № 8415 от 27 августа 2012 г.).

МЕТОД НАИМЕНЬШИХ МОДУЛЕЙ И ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗМЕРЕНИЙ С ОШИБКАМИ РАЗЛИЧНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Для решения обратных задач орбитальной динамики, как правило, применяют метод наименьших квадратов, который наиболее эффективен, если случайные ошибки измерений распределены по нормальному закону. Однако если распределение ошибок существенно отличается от нормального, то эффективность метода оказывается под сомнением.

Впрочем, в качестве достойной альтернативы для решения обратных задач может выступать метод наименьших модулей. Цель исследовательской работы состояла как раз в том, чтобы экспериментально исследовать эффективность метода наименьших модулей в сравнении с эффективностью метода наименьших квадратов при различных распределениях ошибок измерений применительно к линейной (тождественной) и нелинейной (орбитальной) моделям.

В итоге показано, что эффективность метода наименьших квадратов в случае тождественной модели выше только для равномерного и нормального распределений ошибок из всех рассмотренных. Однако после отбраковки грубых наблюдений эффективность метода наименьших модулей почти во всех случаях падает настолько, что становится сравнимой с эффективностью метода наименьших квадратов. Схожая ситуация имеет место в случае орбитальной модели.

Таким образом, результаты приводят к следующему заключению. Поскольку на практике измерения еще до обработки подвергаются процедуре отбраковки, не стоит ожидать существенного превосходства метода наименьших модулей над методом наименьших квадратов по точности. Учитывая, кроме того, простоту программной реализации метода наименьших квадратов, мы бы не рекомендовали прибегать к его рассматриваемой альтернативе.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ОСЕВУЮ РАСКРУТКУ АСТЕРОИДОВ

Эффект Ярковского (идея московского инженера О. И. Ярковского: реактивный эффект за счет неравномерного нагрева планеты влияет на орбитальное движение) получил развитие в рамках небесной механики в работах одного из ведущих советских астрономов В. В. Радзиевского.

Оценено влияние годовичного и суточного эффектов анизотропии переизлучения для сферических астероидов и для астероидов произвольной формы.

При рассмотрении центральных сил (тяготение + световое давление) возникают следующие фотогравитационные задачи двух тел, аналогичные классическим:

- оценка прямого светового солнечного давления на покоящееся тело;
- описание фотогравитационного взаимодействия тел, связь с массой и плотностью;
- задача двух тел при постоянной редукции масс.

Появление добавочных нецентральных сил обусловлено рядом эффектов, из которых нас интересуют следующие:

- влияние анизотропности переизлучения на изменение угловой скорости осевого вращения тела, ускорение или замедление осевой раскрутки (эффект Радзиевского);
- эффект Ярковского за счет анизотропии переизлучения солнечной радиации телом, т. е. изменение орбитального движения в зависимости от направления осевого вращения с учетом термодинамических эффектов;
- объединенный эффект Ярковского—Радзиевского, который состоит в учете влияния анизотропии переизлучения солнечной радиации на ускорение или замедление осевой раскрутки тела. Наибольшее значение этот эффект приобретает, когда осевая раскрутка ускоряется, а ее направление (прямое или обратное) совпадает с направлением орбитального движения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ РЕЗОНАНСОВ НИЗКИХ ПОРЯДКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПАРУСНОСТИ ИСЗ

Работа посвящена исследованию резонансной структуры области движения искусственных спутников Земли. Явление резонанса в движении спутников возникает вследствие несимметричности гравитационного потенциала Земли. Существенное влияние на характер орбитальной эволюции спутника за счет действия сил светового давления оказывает парусность (отношение миделева сечения спутника к его массе). При движении спутника в окрестности резонансных зон возмущения, вызываемые световым давлением, могут приводить к качественным изменениям орбитальной эволюции.

В данной работе были исследованы орбиты спутников, находящихся в окрестности резонансов 1:1 (геостационарные объекты) и 1:2 (спутники навигационных систем GPS, Glonass, Galileo, а также спутники «Молния»). На основе исследования долгопериодической эволюции элементов орбиты спутника при различных значениях парусности с помощью «Численной модели движения ИСЗ» [1] определено положение резонансных областей в околоземном пространстве. Изучено влияние светового давления на эволюцию элементов орбиты спутника при различных значениях парусности.

Библиографические ссылки

1. *Бордовицына Т. В., Батулин А. П., Авдюшев В. А., Конева П. В.* Обновленный комплекс программ «Численная модель движения ИСЗ». — Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2004.

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ 1.2-МЕТРОВОГО ТЕЛЕСКОПА КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Цель работы — создание единой системы управления спектрофотометрическим комплексом на основе 1.2-метрового телескопа Коуровской астрономической обсерватории.

Первым шагом стала разработка сайта, показывающего текущее состояние телескопа и изображение с камеры подкупольного помещения. Сайт доступен по адресу: <http://observ.astro.usu.ru:8080>, а из локальной сети обсерватории: <http://1meter.observ.local>.

В настоящий момент идет разработка веб-приложения для управления телескопом и приборами. Уже реализованы функции управления телескопом, захвата видеопотока с гидирующих камер и автоматическая коррекция положения. Добавлен интерфейс для работы со спектрографом высокого разрешения, который позволяет выбирать и управлять калибровочными лампами, управлять подсветкой оптоволокна, осуществлять фокусировку с произвольным шагом и управлять кроссдисперсором, запоминать его положение. Для фотометра разработан макет интерфейса управления. Он позволяет осуществлять выбор фильтров и управлять поляридом. После окончания изготовления этого прибора необходимо только отладить взаимодействие интерфейса и фотометра. Вкладка для спектрографа низкого разрешения полностью повторяет вкладку для спектрографа высокого разрешения. Также после установки этого прибора нужно вставить лишь код с посылкой известных команд.

По окончании разработки веб-приложения сайт будет доступен по адресу: <https://observ.astro.usu.ru:8090>.

О ВЫБОРЕ МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ И ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ

В данной работе нами было исследовано влияние систематических ошибок, обусловленных неправильным выбором модели движения, на точность построения начальных доверительных областей значений параметров орбиты астероидов. При определении вероятности столкновения любого астероида с большими планетами, включая Землю, модель движения астероида должна быть достаточно точной. Систематическая ошибка в модели, связанная с неучетом каких-либо возмущающих факторов, не должна существенно влиять на точность построения доверительных областей и вероятностное распределение возможных орбит астероида. В противном случае эти области и вероятностные распределения будут иметь заметные смещения в параметрическом пространстве, а сами вероятностные оценки будут недостоверными даже в случае наблюдаемости астероида на больших интервалах времени, охватывающих несколько его оппозиций. Разработанный нами способ определения точности модели движения основан на оценках смещения доверительных областей для разных моделей.

На примере различных астероидов нами была проведена апробация рассматриваемого способа и было показано, что негативными последствиями неправильного выбора моделей могут быть большие смещения расчетных областей возможных движений от области, построенной на основе более точной модели. Способ имеет геометрически ясный, достаточно простой вид и может быть применен как в задаче построения начальных областей возможных параметров орбит астероидов, так и при отображении этих областей во времени.

Работа выполнена по заданию № 2.4024.2011 Министерства образования и науки Российской Федерации.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ КАНДИДАТОВ В ГАЛАКТИКИ С ПОЛЯРНЫМИ КОЛЬЦАМИ

Галактики с полярными кольцами (ГПК) — это системы, в которых одновременно наблюдается вращение относительно двух осей: кроме центрального звездного диска, вращающегося относительно видимой малой оси, в почти перпендикулярной к нему плоскости вращается протяженная звездно-газовая структура, называемая полярным кольцом. В 2011 г. нами (Moiseev et al.) был опубликован список новых кандидатов в ГПК, состоящий из 275 объектов. Сейчас мы представляем результаты статистического анализа основных структурных параметров наиболее надежных кандидатов, включая шесть галактик из более раннего каталога Whitmore et al. (1990). Всего 78 объектов. По архивным изображениям SDSS проведены измерения размеров и параметров ориентации внешних компонент и центральных галактик. Показано, что для большинства кандидатов внешние структуры действительно полярные, т. е. наклонены на угол более 70° к плоскости центральной галактики. На распределениях относительных диаметров полярных структур для галактики с внешними и внутренними полярными кольцами выделяется «провал» для $0.4 < d_{ring}/d_{disk} < 0.8$. Такая бимодальность распределения скорее всего вызвана тем, что полярные и наклонные структуры промежуточного размера оказываются короткоживущими, в то время как стабильность внутренних полярных колец и дисков поддерживается гравитацией балджа, а внешних — темного гало.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-02-00231, а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт № 02.740.11.0247).

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНСАМБЛЯ ШИРОКИХ ДВОЙНЫХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Определение начальной функции масс звезд (НФМ) — одна из фундаментальных проблем астрономии. В настоящий момент известно несколько теоретических НФМ, отличающихся в основном в области малых масс. Определение реальной функции масс затруднено из-за невозможности точно оценить вклады эффектов селекции в наблюдаемые распределения.

Целью данной работы является выявление теоретической НФМ, наиболее близкой к реальной и наиболее реалистичного сценария звездообразования. Для решения этой задачи была написана программа, моделирующая ансамбли двойных систем и применяющая к ним эффекты селекции, свойственные определенным наблюдаемым распределениям. Программа строит псевдонаблюдаемые распределения. Изменяя входные параметры, такие, как сценарии звездообразования, распределения по массам, отношения масс, расстояниям, большим полуосям и эксцентриситетам орбит, мы получаем набор программных распределений. Их статистическое согласие с наблюдаемыми распределениями дает возможность определить НФМ и сценарий звездообразования, наиболее согласующиеся с наблюдениями.

Итогом данной работы являются выводы о применимости наиболее используемых НФМ и сценариев звездообразования.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНСАМБЛЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД И ИХ СВЯЗЬ С НАЧАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Большая часть звезд нашей Галактики входит в состав двойных или кратных систем. Механизм звездообразования окончательно не ясен. Вполне возможно, не существует отдельного способа формирования одиночных звезд и объекты типа нашего Солнца лишь результат эволюции (распада) кратных систем.

В зависимости от стадии, на которой происходит разделение компонент, можно выделить различные способы образования двойных и кратных систем: фрагментация дозвездного молекулярного облака, возникновение неустойчивостей в окружающем протозвездному диску, динамическое взаимодействие с другими объектами, входящими в родительское скопление. Характеристики сформировавшихся систем, несомненно, зависят от механизма образования.

В работе исследуются статистические распределения двойных звезд, их связь с начальными условиями звездообразования и последующей эволюцией. Выявлено, в частности, расхождение с каноническим законом распределения двойных звезд по большой полуоси $f(a) \sim a^{-1}$ для систем в ближайшей солнечной окрестности ($d < 25$ пк). Результаты исследований в перспективе позволяют уточнить теорию звездообразования.

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ МАГЕЛЛАНОВЫХ ОБЛАКОВ НА ПЕРЕХОД ПРОГРАДНЫХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ В РЕТРОГРАДНЫЕ

Исследуется влияние динамики Магеллановых Облаков и других карликовых галактик Местной группы на динамику галактических шаровых скоплений. Показано, что при пролете в области сильного гравитационного влияния Магеллановых Облаков шаровое скопление на вытянутой орбите может изменить знак углового момента на противоположный. В фазовом пространстве начальных условий шаровых скоплений определены такие области, которые допускают изменение знака углового момента шарового скопления на противоположный, т. е. смену направления вращения. В некоторых случаях траектория локально деформируется, что приводит (если в данный момент проводятся измерения скоростей) к тому, что скопление фиксируется на ретроградной орбите. Это показывает возможность того, что ретроградные шаровые скопления родились в Галактике, так же как и проградные.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Минвуза РФ № 14.18.21.0787, а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт № 14.A18.21.1304).

РОЛЬ КРАСНОГО ШУМА ЛУЧЕВОЙ СКОРОСТИ В ПРОГРАММАХ ПОИСКА ЭКЗОПЛАНЕТ: ТОЛЬКО ТРИ ПЛАНЕТЫ В СИСТЕМЕ GJ 581?

В работе проведен детальный анализ последних доступных измерений лучевой скорости красного карлика GJ 581, обладающего многопланетной системой. Использовались опубликованные данные ESO/HARPS и Keck/HIRES. Показано, что эти данные содержат значительный коррелированный случайный компонент (красный шум), вносящий большое количество искажающих эффектов, которые могут ввести в серьезные заблуждения, если работать в традиционной модели белого шума. Моделируя красный шум гауссовским случайным процессом с корреляционной функцией $e^{-\Delta t}$, мы показали, что:

1. Планеты GJ581 *b* и *c* действительно существуют, так как легко выделяются в обоих временных рядах (HARPS и Keck) независимо от принятой модели шумов.
2. Планета GJ581 *e* также подтверждается этими рядами независимо, но, чтобы выделить ее в данных с Кека, нужно обязательно учитывать красный шум.
3. Недавно открытые планеты GJ581 *f* и *g* на самом деле не существуют; соответствующие вариации лучевой скорости созданы красным шумом; в рамках полной модели с красным шумом они статистически незначимы.
4. Планета GJ581 *d* требует серьезной проверки новыми (желательно независимыми) наблюдениями; она вовсе не видна в данных Кека, а ее значимость в данных HARPS резко падает после удаления красного шума.

Таким образом, имеющиеся измерения лучевой скорости GJ581 говорят о наличии не более чем четырех (а быть может, и вовсе трех) планет в данной системе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-31119, а также программы РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной».

О ПОИСКЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ В НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрена методика выявления в зашумленных данных периодического сигнала при помощи периодограмм, построенных на статистическом критерии разности χ^2 (обобщая — на критерии отношения правдоподобия). Особое внимание уделяется вопросу определения статистической значимости найденного таким образом сигнала. Для решения применялась теория экстремальных значений случайных процессов и полей (метод Райса).

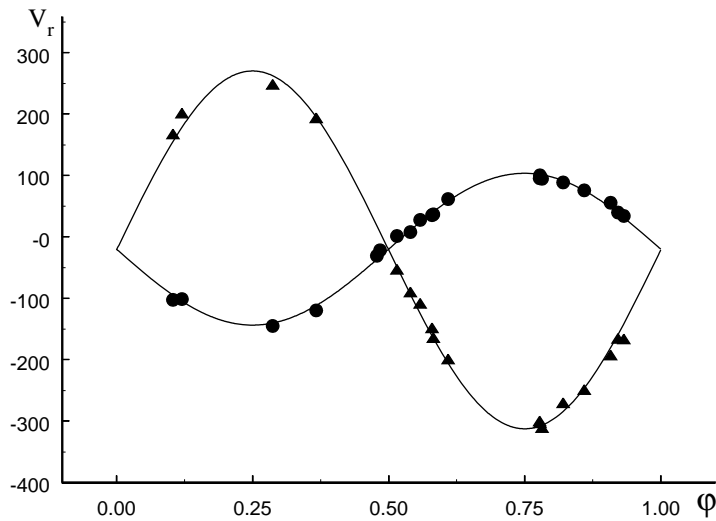
Сигнал может задаваться функциями разного типа. Когда эта функция линейна по всем параметрам, кроме частоты, выражение для вероятности ложной тревоги, характеризующей значимость найденной периодичности, имеет вид $FAP \lesssim Ae^{-z}z^{(d-1)/2}$, где z — максимальный отсчет периодограммы; d — число параметров сигнала (помимо частоты); A — некий коэффициент. К линейным сигналам относятся, в частности, синусоида и отрезок ряда Фурье (тригонометрический многочлен). На синусоиде основана известная периодограмма Ломба—Скаргла, для которой $FAP \lesssim We^{-z}\sqrt{z}$, где W — ширина исследуемой частотной полосы, помноженная на длину временного ряда. Во втором случае мы имеем так называемую мультигармоническую периодограмму, для которой $FAP \lesssim W\alpha_n e^{-z}z^{n-1/2}$ (n — степень старшей гармоники, α_n — определенные числа).

Более сложный случай, когда сигнал можно моделировать лишь нелинейной функцией. Для такой периодограммы получено приближение вида $FAP \lesssim e^{-z}P_{d-1}(\sqrt{z})$, где P — некий многочлен, зависящий от конкретной формы сигнала и геометрии области параметров. Здесь мы рассмотрели подробно модель сигнала вида $e^{k \cos x}$ (функция фон Мизеса, которая неплохо моделирует кривую блеска переменных звезд самых разных типов) и кеплеровскую модель кривой лучевой скорости звезды со спутником (с планетой, например).

Работа поддержана РФФИ (проект №12-02-31119) и программой Президиума РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной».

ПЗС-СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СС CAS НА ОПТОВОЛОКОННОМ ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОМЕТРЕ 1.2-м ТЕЛЕСКОПА АО УРФУ

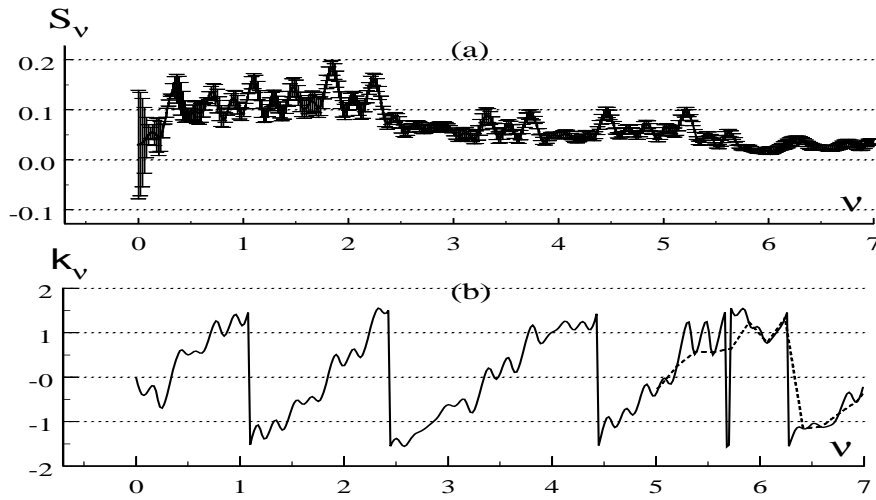
Представлены результаты спектральных наблюдений затменной переменной звезды с массивными компонентами раннего спектрального класса СС Cas, впервые выполненные с применением ПЗС-приемника. Измеренные полуамплитуды кривых лучевых скоростей компонентов $K_1 = 123.9$ км/с и $K_2 = 292.4$ км/с сравнимы с приведенными в литературе величинами, а скорость центра масс системы $V_0 = -20.4$ км/с, что приблизительно на -10 км/с больше ранее опубликованных значений. Это может свидетельствовать в пользу высказанного в литературе предположения о наличии третьего тела в системе. Величина среднеквадратической ошибки разброса значений лучевых скоростей второго, более слабого компонента СС Cas относительно кривой лучевых скоростей в 2.5 раза меньше ранее приведенной в литературе оценки, полученной с помощью светоприемника — ретикон.



Кривые лучевых скоростей СС Cas: ● — главный компонент; ▲ — вторичный компонент

КОРРЕЛЯЦИИ И НЕУСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕБАНИЙ ФАЗОВОЙ ПЛОТНОСТИ В МОДЕЛЯХ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

Для 6 динамических моделей РЗС вычисляются спектры S_ν частот ν и дисперсионные соотношения $k_\nu = k(\nu)$ с помощью Фурье-преобразований автокорреляционных и взаимных корреляционных функций для флуктуаций фазовой плотности f в центре скопления и в точках, равномерно распределенных по окружающей его сфере радиуса r .



Зависимости S_ν и k_ν от ν в модели 1 РЗС при $r = 1$ пк

График спектра частот S_ν (см. рисунок) показывает многочисленные локальные максимумы, соответствующие как устойчивым, так и неустойчивым колебаниям f повышенной мощности. Волнообразные участки k_ν определяют периоды и времена нарастания неустойчивостей колебаний f , а вещественные корни уравнения $k_\nu = 0$ — периоды устойчивых колебаний f . Результаты исследования обеих кривых могут быть использованы для анализа неустойчивостей, обусловленных действием различных механизмов в моделях РЗС: действием силового поля Галактики на скопление, негомолочностью колебаний скопления и ядра, формированием поляризационных облаков, действием резонансов между колебаниями f на разных частотах, турбулентностью в движениях звезд ядра.

ДИНАМИКА КОРОН РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

Предлагается метод выделения корон в моделях рассеянных звездных скоплений (РЗС). Метод использует траектории звезд, не выходящих за пределы корон на промежутках времени t , сравнимых со средним временем жизни РЗС τ . Для 6 численных моделей РЗС построены модели корон, определены параметры корон, направление и характер их динамической эволюции. В коронах преобладают обратные движения звезд. Несмотря на признаки динамической неустойчивости корон (малые плотности в сравнении с критической и ускоренное расширение корон), в интервале расстояний $r/r_t \in (1, 3)$ звезд от центра скопления отмечено формирование близких к равновесным распределений плотности и фазовой плотности (r_t — приливный радиус скопления). Построены аппроксимации фазовой плотности короны и скопления распределениями, зависящими от трех аргументов (удельные энергия движения звезды и угловой момент движения звезды относительно оси z , а также квадрат скорости движения звезды вдоль оси z ; здесь использовалась вращающаяся система координат Линдблада (x, y, z)). Такое временное равновесие корон обусловлено балансом числа звезд, приходящих в корону из центральных областей скопления и уходящих на периферию короны или за ее пределы. Обнаружены признаки гравитационной связанности звезд короны вплоть до расстояний в $\sim 4r_t$ от центра скопления (наличие близких к периодическим обратных средних движений большого числа звезд короны в плоскости (xy) ; 91—99 % звезд короны на промежутках времени τ удовлетворяют критерию гравитационной связанности [1]). Получены оценки скорости диссипации звезд короны $\dot{N} = -(0.03\text{—}0.23)N/\tau_{v.r.}$ при $t \gtrsim \tau$, где N — число звезд короны; $\tau_{v.r.}$ — время бурной релаксации скопления.

Библиографические ссылки

1. *Ross D. J., Mennim A., Heggie D. C.* Escape from a tidally limited star cluster // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1997. — Vol. 284. — P. 811—814.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЙ ОРБИТЫ ТДС В ПОЛЕ СМЧД

Известно, что эффекты наблюдательной селекции в значительной мере искажают истинную статистику звезд, в том числе и тесных двойных систем (ТДС). Однако искажение статистики может быть обусловлено и рядом физических процессов, включая, например, распад малых звездных скоплений, гиперболический пролет звезд, приводящий к распаду двойных систем или захвату третьего компонента, а также взаимодействие с полем сверхмассивной черной дыры (СМЧД).

Данная работа посвящена проблеме устойчивости орбиты ТДС в поле СМЧД. В рамках задачи трех тел моделируется история деформации начальной орбиты ТДС, ориентация которой относительно СМЧД задается случайным образом. Также варьируется начальная орбитальная скорость ТДС по орбите вокруг СМЧД, чтобы обеспечить заданное расстояние до перицентра ($100, 50, 25, 10, 5 R_o$). Варьируется масса СМЧД от 10^6 до $10^9 M_o$. Все это создает статистику для отбора перспективных конфигураций начальной орбиты ТДС для изучения условий возникновения релятивистских скоростей у одного из компонентов ТДС в результате прохождения вблизи СМЧД.

Отобранные конфигурации начальных орбит повторены в рамках задачи N -тел для компонентов ТДС, при этом черная дыра рассматривается как точечный объект. Модель N -тел позволяет описать эффекты приливной деформации компонентов ТДС вследствие их прохождения вблизи СМЧД, включая такие экстремальные финалы, как слияние компонентов ТДС, разрушение одного или обоих компонентов в поле СМЧД.

ФУНКЦИЯ СВЕТИМОСТИ АКТИВНЫХ ГАЛАКТИК ТИПА NLSY ПО ДАННЫМ ОБЗОРА SDSS DR7

По данным обзора SDSS DR 7 были получены функции светимости AGN первого типа в запрещенной линии $[\text{OIII}]\lambda 5007\text{\AA}$. Особое внимание уделено подклассу сейфертовских галактик, так называемым NLSy1, определяющим свойством которых является относительная узость широких разрешенных линий в оптическом спектре $FWHM \leq 2000$ км/с. В работе обсуждается новая методика получения функции светимости по данным для эмиссионных линий, позволяющая в том числе учесть вариации плотности Вселенной из-за крупномасштабной структуры. Полученные функции светимости сравниваются с таковыми для других типов AGN по данным из литературы. Предсказываемая на основе наших результатов рентгеновская функция светимости демонстрирует хорошее согласие с наблюдениями.

Также был обнаружен тот факт, что галактики типа NLSy1 занимают более узкий диапазон по светимостям AGN, чем BLSy1 при том, что $\langle L_{AGN} \rangle$ у них находятся в пределах погрешности.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта в форме субсидий в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы (соглашение № 8405), а также НШ-2915.2012.2 «Образование крупномасштабной структуры Вселенной и космологические процессы» и программы Президиума РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной 2012».

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДЛЯ ЗВЕЗД ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И БОЛОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОПРАВКИ

В литературе существует несколько методов для расчета базовых теплофизических величин звезд (эффективной температуры и болометрической поправки) по фотометрическим данным. Нами был произведен анализ методов расчета эффективной температуры и болометрической поправки, в которых в качестве исходных данных используется показатель цвета $B-V$, а также методов, использующих $B-V$ совместно с коэффициентом Fe/H . Было обнаружено, что эти методы дают различные значения теплофизических величин для одной и той же звезды. Как следствие, возникла задача отбора метода или их группы, дающих наиболее достоверные результаты.

Эта задача в работе решается двумя способами. Первый: по ряду звезд с надежно установленными значениями эффективной температуры и болометрической поправки (в работе выбраны данные [1]) ранжируются методы по их точности для описания каждого класса звезд. Далее записывается «универсальный» метод, который «составляется» из методов, показавших наилучший результат для каждого класса. Второй способ базируется на работе [2], в которой предложена статистическая процедура получения наилучшего предсказания температуры по имеющимся независимым значениям. Полученные результаты, их сравнение и ограничения можно найти на сайте [3].

Библиографические ссылки

1. *Allen C. W.* Astrophysical Quantities. — L., UK : Athlone Press, 1973.
2. *Malyuto V., Shvelidze T.* Determination of Homogenized Effective Temperatures from Stellar Catalogs // Baltic Astronomy. — 2011. — Vol. 20. — P. 91—106.
3. Star Clusters. URL: <http://starclusters.narod2.ru>.

СТЕПЕНЬ ИОНИЗАЦИИ ТЕРМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ HD 209458B

Экзопланета HD 209458b относится к классу горячих юпитеров — планет, имеющих массу, сравнимую с массой Юпитера, но расположенных не дальше чем 0.1 а. е. от звезды. Согласно результатам наблюдений в УФ-диапазоне, проведенных Vidal-Madjar и др. на HST [1], эта планета окружена оболочкой нейтрального водорода, содержащей надтепловые атомы. Предполагается, что оболочка покидает планету с темпом 10^{10} г·с⁻¹. В такого рода процессах, происходящих в атмосфере, большую роль играют надтепловые частицы, в том числе фотоэлектроны. В данной работе впервые оценивается вклад высокоэнергичных фотоэлектронов в процессы ионизации. Для этого с помощью метода Монте-Карло рассчитываются темпы ионизации компонентов атмосферы для двух аэрономических моделей [2, 3]. На основе полученных скоростей ионизации вычисляются концентрации электронов и ионов в атмосфере планеты, а также степень ионизации термосферы. Показано, что при учете ионизации фотоэлектронами равновесная концентрация электронов в атмосфере вырастает в несколько раз. На основе построенной модели планируется создать полную аэрономическую модель атмосферы экзопланеты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-02-00479а), программы Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы», гранта НШ-3602.2012.2, гранта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.

Библиографические ссылки

1. Vidal-Madjar A., Lecavelier des Etangs A., Désert J.-M. et al. An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b // Nature. — 2003. — Vol. 422. — P. 143—146.
2. García Muñoz A. Physical and chemical aeronomy of HD 209458b // Planetary and Space Science. — 2007. — Vol. 55. — P. 1426—1455.
3. Yelle R. V. Aeronomy of extra-solar giant planets at small orbital distances // Icarus. — 2004. — Vol. 170. — P. 167—179.

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПЫЛИ В ЗОНАХ НII

Обзоры неба, выполненные в ИК-диапазоне, показали, что в зонах НII наблюдается пространственное разделение излучения на длине волны 8 и 24 мкм. Наши расчеты показывают, что объяснить это разделение можно лишь при условии, что некоторые компоненты пыли, в частности полиароматические углеводороды (ПАУ), отсутствуют, собственно, в зоне НII, будучи сосредоточенными в узкой оболочке вокруг нее. Ранее высказывались предположения, что отсутствие пыли в зонах НII может быть связано с действием звездного ветра или давлением излучения. Рассмотрев в качестве примера зону НII RCW 120, мы пришли к выводу, что наблюдаемый радиальный профиль излучения на длине волны 8 мкм можно воспроизвести в предположении, что частицы ПАУ разрушаются под действием УФ-излучения звезды, породившей зону НII. Наблюдаемый профиль излучения на 24 мкм удастся воспроизвести в предположении, что мелкие графитовые пылинки (VSG) присутствуют в зоне НII в той же пропорции, что и в невозмущенном веществе, то есть механизм, ответственный за удаление ПАУ, не должен затрагивать более крупные частицы. Действие ветра на VSG-частицы заметно лишь в ближайших окрестностях звезды, где наша модель предсказывает центральный пик в излучении на 24 мкм, тогда как на самом деле излучающая область имеет форму компактного кольца.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-02-00612, гранта Президента РФ НШ-3602.2012.2. и программы Президиума РАН П-21.

М. С. Кирсанова¹, А. М. Соболев², Д. З. Вибе¹,
К. Хенкель³, А. П. Цивилев⁴

¹Институт астрономии РАН

²Уральский федеральный университет

³Институт радиоастрономии им. М. Планка

⁴Пушинская радиоастрономическая обсерватория ФИАН

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ВБЛИЗИ ЗОНЫ НII S235

Мы провели наблюдения излучения аммиака в направлении на области звездообразования, расположенные вблизи зоны НII S235. Работа проведена с целью определения плотности газа и его температуры в молекулярных сгустках, содержащих молодые звездные скопления. Кинематическая структура газа показывает, что как минимум два молодых звездных скопления (S235 East 2 и S235 Central) могли быть сформированы в результате триггерного процесса «сбора и сжатия», если концентрация газа превышала $3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Скопление S235 East 1 могло быть сформировано в результате воздействия ударной волны от расширяющейся зоны НII на уже существующий плотный сгусток. Скопление S235 East 1, видимо, находится на более ранней стадии эволюции, чем S235 East 2 и S235 Central. Параметры плотного газа в направлении области звездообразования S235 A-B показывают, что зона НII S235 A расширяется в среду с повышающейся плотностью. Сама же S235 A еще слишком молода, чтобы индуцировать звездообразование посредством процесса «сбора и сжатия» вокруг себя.

Работа поддержана фондом РФФИ (гранты 10-02-00612, 11-02-01332) и грантом Президента РФ НШ-3602.2012.2.

ИССЛЕДОВАНИЕ X-ФАКТОРА НА РАННИХ СТАДИЯХ КОЛЛАПСА МОЛЕКУЛЯРНОГО ОБЛАКА

Для исследования плотных участков межзвездной среды, в частности молекулярных облаков, часто используются наблюдения в линиях СО. При этом для интерпретации данных наблюдений применяется конверсионный фактор (X -фактор):

$$X = \frac{N_{H_2}}{W_{CO}},$$

где W_{CO} — интенсивность излучения СО; N_{H_2} — лучевая концентрация молекулярного водорода.

Данный коэффициент считается постоянным и примерно равным $X \simeq 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2} \text{ К}^{-1} \text{ км}^{-1} \text{ с}$. Однако последнее время существует множество исследований, в которых показано, что значение X -фактора не является постоянным в межзвездной среде и существенно зависит от множества факторов (таких, как металличность, экстинкция и др.).

Было проведено исследование изменения величины X -фактора в процессе образования молекулярного облака. Исследования проводились с использованием самосогласованного численного моделирования химической и динамической эволюции межзвездного газа. В результате многочисленных экспериментов показана зависимость конверсионного фактора от параметров облака (массы и профиля плотности), внешних условий (интенсивности фонового излучения), металличности среды. Также показано, что X -фактор значительно меняется (более чем на порядок) в зависимости от этапа коллапса облака.

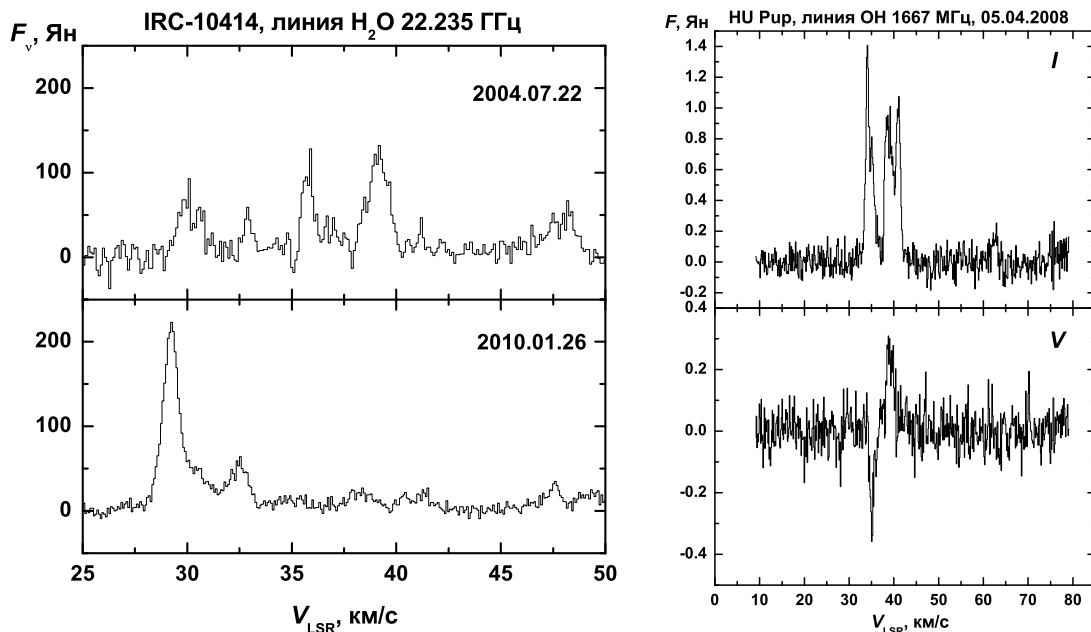
СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В КАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗДАХ ТИПА WZ SGE: НАБЛЮДЕНИЯ

Проведены спектральные и фотометрические наблюдения катаклизмической переменной звезды V455 And, которая является характерным представителем подкласса систем типа WZ Sge. Анализ проведенных наблюдений подтвердил наличие в аккреционном диске газодинамических эффектов, обнаруженных в результате анализа численного моделирования системы. Результаты анализа наблюдений согласуются с предложенной моделью формирования двугорбой структуры кривой блеска системы V455 And, основанной на численном моделировании.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-31031-мол_а.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ МАЗЕРОВ

Мониторинг космических источников мазерного радиоизлучения в молекулярных линиях проводится группой отдела радиоастрономии ГАИШ МГУ на протяжении ряда лет. В том числе наблюдения в линии водяного пара (H_2O) 22.235 ГГц ведутся с 1979 г. совместно с группой ФИАН на радиотелескопе РТ-22 Пущинской радиоастрономической обсерватории. Получены ряды наблюдений переменности для выборки 125 мазеров H_2O (области звездообразования и переменные звезды поздних классов). На рисунке слева приведены два спектра линии H_2O М-сверхгиганта IRC–10414. Наблюдения той же выборки космических мазеров в линиях гидроксила (OH) выполняются с 1969 г. на радиотелескопе Радиоастрономической станции Нансэ совместно с французскими радиоастрономами. Приемная аппаратура позволяет измерять четыре параметра Стокса поляризации, что дает возможность оценивать напряженность магнитного поля в источнике. Получены величины порядка нескольких миллигаусс. Параметры Стокса I и V для полуправильной переменной HU Rur приведены на рисунке справа.



Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-02-00963-а.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТА IRAS 19312+1950 В ЛИНИЯХ МЕТАНОЛА

IRAS 19312+1950 — загадочный объект: с одной стороны, в нем наблюдаются спектральные признаки проэволюционировавшей AGB-звезды, с другой — линии молекул, обильных при испарении мантий пылевых частиц межзвездной среды, что характерно для окрестностей молодых звездных объектов.

Для выяснения природы объекта на 45-м телескопе Нобеямской радиообсерватории (Япония) в интервале частот от 23 до 109 ГГц проведены наблюдения радиолиний молекулы метанола в направлении IRAS 19312+1950.

Интенсивности наиболее ярких зарегистрированных линий (три линии из квартета на 96.7 ГГц и линия на 48.3 ГГц) и верхние пределы для остальных обнаруженных квазитепловых линий метанола были использованы для оценки физических условий в молекулярном сгустке. Расчеты проводились в приближении большого градиента скорости по методике, описанной в диссертации С. В. Салий (2009).

Хорошее соответствие между модельными и наблюдаемыми яркостями исследуемых линий метанола достигается при следующих физических параметрах: $T_k = 36$ К, $n_{\text{H}_2} = 5 \times 10^4$ [см⁻³] и $N_M/\Delta V = 2 \times 10^8$ [см⁻³с].

Полученные оценки характерны для молекулярных сгустков, нагретых ударными волнами умеренной мощности. Возможно, IRAS 19312+1950 является AGB-звездой, которая генерирует ударные волны в окружающем ее молекулярном газе. Этим объясняется наличие излучения молекул, характерных для газа, нагретого ударными волнами от молодых звездных объектов.

Работа проводилась при финансовой поддержке Федеральной целевой программы (государственный контракт № 14.518.11.7064).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ДВИЖЕНИЕ АСЗ

Данная работа посвящена изучению влияния различных возмущающих факторов на движение астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). К объектам исследования относятся четыре АСЗ — 3200 Phaethon, 2006 VB14, 137170 1991 HF1 и 99942 Apophis. Оценка возмущений проводилась пятью различными методами, в набор оцениваемых возмущающих ускорений включены гравитационные возмущения от больших планет, Луны, Плутона, Цереры, Паллады, Весты, сжатия Земли и негравитационные ускорения — прямое световое давление и релятивистские эффекты от Солнца. Целью работы являлась категоризация компонентов модели сил на сильные, средние и слабые возмущающие ускорения, оцениваемые в рамках задачи получения расчетных положений астероидов при расчетах разностей О-С и исследования вероятностной орбитальной эволюции. Критерии разделения возмущающих ускорений на группы задавались средней точностью позиционных наблюдений, проводимых с поверхности Земли.

Результаты, полученные с применением независимых методик, обладают хорошей согласованностью между собой. Прямое световое давление, к примеру, при использовании четырех методик оказывается в среде слабых возмущающих ускорений с оценкой влияния ниже уровня шума. С другой стороны, релятивистские эффекты от Солнца уверенно занимают место в группе средних возмущающих ускорений, на основании чего делается вывод о целесообразности использования релятивистских эффектов в наборе возмущающих ускорений при определении положений АСЗ и исследовании орбитальной эволюции. Проведение комплексного исследования, включающего детальное изучение структуры возмущений, позволяет сформировать оптимальную модель движения объектов, которая необходима для оценки точности позиционных наблюдений АСЗ и исследования их орбитальной эволюции.

Работа выполнена по заданию № 2.4024.2011 Министерства образования и науки Российской Федерации.

О ПРИЛОЖЕНИЯХ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ КЕПЛЕРА ДЛЯ БЛИЗПАРАБОЛИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Орбиты большинства планет Солнечной системы и в меньшей степени ИСЗ близки к круговым. Однако часть ИСЗ и КА, а также кометы движутся по высокоэллиптическим орбитам. «Кометными» эксцентриситетами обладают также ряд астероидов и экзопланет. Среди нумерованных астероидов наблюдаются тела с $e > 0.97$, а среди нenumерованных — с $e > 0.98$. Среди внесолнечных планет открыто несколько объектов с эксцентриситетом, превышающим 0.9. Наибольшим эксцентриситетом $e = 0.97$ обладает планета HD20782 b. Чтобы тело покинуло систему с наименьшими затратами энергии, оно должно выйти на близкую к параболе гиперболическую орбиту. По слабогиперболической орбите движется и захватываемое планетной системой тело до тесного сближения с одной из планет.

Неточность определения элементов орбит по наблюдениям также делает актуальным описание окрестности параболических орбит. Для долгопериодических комет это основная причина, из-за которой трудно определить тип ее траектории. Полученные нами результаты, возможно, помогут в решении проблемы апоцентрических расстояний комет. Известно, что распределение комет по эксцентриситетам имеет две моды: плавную $e = 0.4–0.8$, что соответствует поясу астероидов, и острую при $e = 0.95–1.01$. Однако неясно, содержит ли острая мода два различных типа комет, соответствующих не только поясу Койпера, но и гипотетическому облаку Оорта.

Работа выполнена при поддержке Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-3290.2010.2).

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В АККРЕЦИОННЫХ ДИСКАХ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

В работе исследуется влияние эффекта Холла на величину и геометрию магнитного поля в аккреционных дисках молодых звезд. Для случая слабоионизованной плазмы в трехкомпонентном приближении выводится обобщенный закон Ома. Уравнение индукции в этом приближении записывается с учетом эффекта Холла, омической и магнитной амбиполярной диффузии. В рамках кинематической МГД модели аккреционных дисков определяется магнитное поле. Модель является обобщением модели Шакуры и Сюняева для учета крупномасштабного магнитного поля. Показывается, что недиссипативные холловские токи приводят к преобразованию пологидальной компоненты магнитного поля в тороидальную и наоборот.

УТОЧНЕНИЕ СКОРОСТИ УБЫВАНИЯ ОБЩЕГО ЧЛЕНА РЯДА ЛАПЛАСА ДЛЯ ГЕОПОТЕНЦИАЛА

Автором разработана модификация метода наименьших квадратов, позволяющая оценивать по численным данным основной параметр оценки Холшевникова—Антонова общего члена ряда Лапласа для гравитационного потенциала тел нерегулярной структуры. Земля — наиболее исследованный реальный объект, и модель геопотенциала EGM2008 содержит большое количество гармоник, что позволяет получить надежные результаты с помощью указанной методики. Анализ результатов показал, что, возможно, у метода существует систематическая ошибка. Ее анализу и оценке посвящена данная работа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным направлениям (грант 6.37.110.2011) и РФФИ (грант 11-02-00232-а).

Стендовые доклады

Р. В. Балуев

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

PlanetPack: СРЕДСТВО АНАЛИЗА ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ЗВЕЗД ДЛЯ ПОИСКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

В проекте решалась задача создания новых, более эффективных методов статистического анализа наблюдательных данных для целей поиска и исследования внесолнечных планет и их систем. Конечным практическим результатом этой работы является программный пакет (на C++), значительно облегчающий решение многих задач, которые часто встают при обработке рядов высокоточных измерений лучевых скоростей звезд. Сюда относятся, в частности:

- Корректный учет явления собственного дрожания лучевой скорости звезды, содержащий процедуру оценки данного дрожания «на лету», на основе метода максимального правдоподобия;
- Обработка данных с учетом эффектов коррелированного звездного дрожания (явление красного шума), которая осуществляется также при помощи метода максимального правдоподобия;
- Эффективный поиск периодичностей в наблюдениях при помощи обобщения классической периодограммы Ломба—Скаргла и включающий эффективную оценку статистической значимости выявляемых периодических сигналов;
- Исследование динамики экзопланетных систем при помощи эффективного интегратора В. А. Авдюшева, представляющего собой обобщение интегратора Эверхарта.

Созданный программный пакет не имеет аналогов как по охвату решаемых задач, так и по вычислительной производительности и простоте обращения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-31119, а также программы Президиума РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРУСНОСТИ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ПОЗИЦИОННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ НА ТЕЛЕСКОПЕ СБГ АО УрФУ

На телескопе СБГ АО УрФУ проводятся регулярные позиционные наблюдения высокоорбитальных космических объектов. За период с сентября 2010 по октябрь 2012 г. определено свыше 8 900 точных положений для более чем 250 высокоорбитальных объектов. По результатам наблюдений построено более 300 улучшенных орбит. Уточненные элементы орбит, оценки произведения коэффициента отражения k и парусности γ получены с помощью программного комплекса *Celestial Mechanics* [1], разработанного в Астрономическом институте Бернского университета.

Для десяти геосинхронных и двух супергеосинхронных объектов оценки $k\gamma = 0.011\text{--}0.175 \text{ м}^2/\text{кг}$. Для 23 объектов на высокоэллиптических орбитах $k\gamma = 0.016\text{--}0.94 \text{ м}^2/\text{кг}$. Результаты обработки наблюдений показывают, что минимально необходимый интервал времени для получения надежных (с погрешностью не более 30 %) оценок произведения $k\gamma$ составляет: 19 суток — для геосинхронных орбит, 7 суток — для орбит типа «Молния», 5 суток — для орбит в окрестности резонанса 1 : 3.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке за счет Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы» (государственный контракт № 14.518.11.7064).

Библиографические ссылки

1. *Beutler G. Methods of Celestial Mechanics. Vol. 2.* — В.; Heidelberg : Springer-Verlag, 2005.

ПРОБЛЕМА ОБРАЗОВАНИЯ СЕМР-ЗВЕЗД

СЕМР-звезды (Carbon Enhanced Metal Poor stars) — особый класс низкометаллических звезд, обладающих низким содержанием железа ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -5$), но большим содержанием углерода и кислорода ($[\text{C}/\text{Fe}] \sim 4$) в атмосферах (см. рисунок). Считается, что это звезды переходного типа, образовавшиеся вскоре после эпохи первых звезд (звезд населения III). Таким образом, СЕМР-звезды могут быть важным связующим звеном между ненаблюдаемыми первыми звездами и наблюдаемыми низкометаллическими звездами населения II. Особенности химического состава СЕМР-звезд до сих пор остаются необъясненными (Beers&Christlieb, 2005). В предлагаемой работе сделана попытка объяснить состав СЕМР-звезд с помощью учета неравномерного перемешивания вещества в галактике. Результаты работы показывают, что при использовании ряда предположений становится возможным объяснение особенностей химического состава СЕМР-звезд.

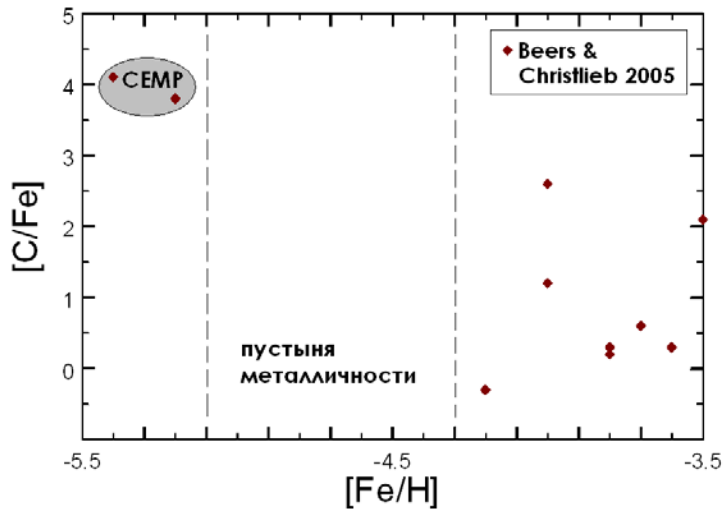


Диаграмма $[\text{Fe}/\text{H}]$ — $[\text{C}/\text{Fe}]$ для низкометаллических звезд. Показана область СЕМР-звезд

Работа поддержана грантом РФФИ 10-02-00231.

© Кабанов А. А., 2013

CH₃CN В МОЛЕКУЛЯРНОМ ЯДРЕ NGC 6334I

Исследования гигантского молекулярного облака NGC 6334 в различных спектральных диапазонах обнаруживают многочисленные области звездообразования. К таким областям относят молекулярные ядра NGC 6334I и NGC 6334I(N), расположенные в северной части облака. По данным спектрального обзора молекулярных ядер [1] в избранных частотных диапазонах получены оценки физических параметров источника NGC 6334I. Излучение молекулы метилцианида (CH₃CN) считается хорошим трассером горячих ядер. Для молекулы CH₃CN стандартным методом вращательных диаграмм определены вращательная температура, лучевая концентрация и химическое обилие. Вращательные диаграммы строились отдельно для переходов с энергией нижнего уровня $E_{low} \lesssim 150$ К и $E_{low} > 150$ К для различных частотных групп. Для 6 переходов с $E_{low} \lesssim 150$ К, $J = 6-5$, $K = 0, \dots, 5$, с частотами группы переходов на 110 ГГц получены вращательная температура $T_{rot} = 214$ К, лучевая концентрация $N_m = 4.6 \times 10^{13}$ см⁻², а обилие молекулы составляет $N_m/N_{H_2} = 1.5 \times 10^{-11}$ (в предположении, что лучевая концентрация водорода 3×10^{24} см⁻²). По 5 переходам с $E_{low} \lesssim 150$ К, $J = 13-12$, $K = 0, \dots, 4$, с частотами группы переходов на 239 ГГц $T_{rot} = 159$ К, $N_m = 3.3 \times 10^{12}$ см⁻², $N_m/N_{H_2} = 1.1 \times 10^{-12}$. Для оценки по 5 переходам с $E_{low} > 150$ К, $J = 8-7$, $K = 0, 1, 2, 4, 6$, с частотами группы переходов на 147 ГГц требуется дополнительный анализ с учетом оптической толщины.

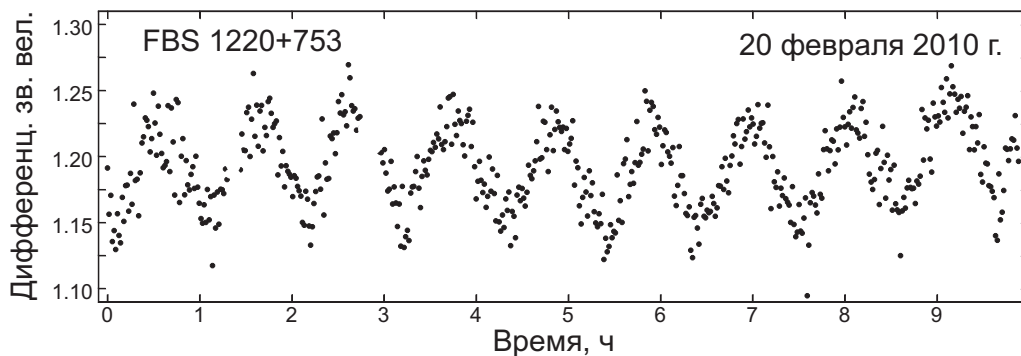
Полученные оценки подтверждают наличие в молекулярном ядре NGC 6334I горячих областей, что свидетельствует об активных процессах звездообразования, идущих в ядре.

Библиографические ссылки

1. *Kalinina N. D., Sobolev A. M., Kalenskii S. V.* Spectral survey of NGC 6334 in the range of 80.5–242.0 GHz // *New Astronomy*. — 2010. — Vol. 15, iss. 7. — P. 590–608.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗВЕЗДЫ FBS 1220+753

В звезде FBS 1220+753, считающейся катаклизмической переменной, нами были обнаружены колебания блеска с периодом 1.07 ч (см. рисунок). Колебания с коротким периодом могут вызываться вращением белого карлика. В этом случае FBS 1220+753 должна быть промежуточным поляраром. Однако звезда не показывала фликеринга и других изменений блеска, типичных для катаклизмических переменных. Колебания с коротким периодом могут вызываться также пульсациями звезды типа δ Щита, которые могут показывать существенно большую нестабильность периода, чем нестабильность периода промежуточных поляраров. В 2010—2012 гг. на 70-см телескопе нами были проведены наблюдения FBS 1220+753 общей продолжительностью 160 ч. Тщательный анализ позволил найти скорость изменения периода $dP/dt = (2.2 \pm 0.2) \times 10^{-9}$. Это в двадцать раз больше, чем скорость изменения наиболее быстро меняющего периода промежуточного полярара PQ Gem. Следовательно, FBS 1220+753 не является промежуточным поляраром. Однако объяснение колебаний пульсациями звезды типа δ Щита также вызывает трудности. FBS 1220+753 имеет высокую галактическую широту ($+42^\circ$) и должна принадлежать населению II, тогда как классические звезды типа δ Щита принадлежат населению I.



Пример дифференциальной кривой блеска FBS 1220+753

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЛЯ ДВУХКАНАЛЬНОГО РАДИОМЕТРА РТ-22 ДИАПАЗОНА 8 мм

Цель работы состоит в отработке методики одновременных наблюдений двух спектральных линий с помощью двухканального радиометра диапазона 8 мм, который является развитием штатного одноканального радиометра диапазона 8 мм РТ-22 ФИАН. Радиометр должен работать под управлением системы автоматизации спектральных наблюдений.

Новая система автоматизации имеет следующие особенности.

- спектральный анализ с помощью нового цифрового анализатора спектра, имеющего две независимые полосы анализа;
- автоматический расчет и управление частотами гетеродинов;
- улучшенный интерфейс наблюдателя для управления частотами, а также для отображения спектров в процессе наблюдений;
- поддержка двух выходных форматов файлов: Sym и Fits;
- модульность и расширяемость благодаря использованию языка C++ при разработке.

Работоспособность системы продемонстрирована путем проведения пробных наблюдений космических источников излучения в рекомбинационных линиях водорода, а также в линиях метанола. Сигнал был зарегистрирован, причем его характеристики (лучевая скорость, ширина линии) находятся в согласии с данными других радиотелескопов.

П. А. Левкина¹
Н. С. Бахтигараев¹
В. В. Чазов²

¹Институт астрономии РАН
²Государственный астрономический
институт им. П. К. Штернберга

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ФРАГМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В 2012 г.

Информация о состоянии околоземной космической среды необходима не только для ее безопасного освоения и эксплуатации, но и для оценки текущей экологической ситуации. Основное отличие неработающих спутников и фрагментов космического мусора от действующих аппаратов — это неконтролируемое движение по орбите, которое необходимо отслеживать также в целях безопасности человеческой деятельности в космосе.

С 19 мая по 2 июня и с 1 по 14 сентября 2012 г. на Терскольском филиале ИНАСАН были проведены оптические наблюдения искусственных спутников Земли и фрагментов космического мусора.

Целью наблюдений были высокоорбитальные фрагменты космического мусора (в том числе малоразмерные объекты), а также поиск и обнаружение утерянных и ранее неизвестных фрагментов. Были уточнены координаты фрагментов космического мусора, орбиты которых находятся в зоне действующих искусственных спутников Земли (класс опасных объектов).

Были произведены наблюдения 62 объектов, для которых определено свыше 3 000 положений. Для 28 объектов были определены параметры орбиты. Для 24 объектов вычислены эмпирические коэффициенты отношения средней площади объекта к его массе (C_r). Значения C_r лежат в пределах от 0.017 до 7.35 м²/кг.

О БЫСТРЫХ КОЛЕБАНИЯХ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Вращение солнечных пятен носит разнообразный характер. Наблюдаются медленные повороты с периодами 7—15 суток, которые носят характер крутильных колебаний, причем период и амплитуда колебаний связаны между собой линейно. На фоне таких медленных поворотов наблюдаются кратковременные колебания в течение небольших интервалов времени (20—40 мин). А у некоторых пятен обнаружены очень быстрые повороты в пределах 5—10 мин с амплитудами 5—7°.

По наблюдательному материалу, полученному на солнечном телескопе АЦУ-5 астрономической обсерватории УрФУ в Коуровке в течение 2001—2006 гг., рассматривались очень быстрые резкие повороты, которые, как кажется на первый взгляд, носят случайный характер.

Наблюдательный материал представляет снимки солнечных пятен, полученных видеокамерой с интервалом 1 мин в течение 5 с. Из серии снимков отбираются несколько наилучшего качества, по которым и определяется поворот пятна.

Использовались снимки почти 70 различных пятен. Рассматривалась связь внезапных поворотов с разнообразными характеристиками пятен: напряженностью магнитного поля в пятне, величиной пятна, средней скоростью вращения, конфигурацией группы, в которую входит пятно, гелиографической широтой, возрастом пятен, возможными активными процессами, происходящими вблизи пятна.

ЭМИССИЯ ЛИНИЙ H и K CaII В ПЕТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДВУХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ

В июле — августе 2012 г. с помощью ПЗС-системы SXV-H9 Starlight Xpress, установленной на дифракционном спектрографе АСП-20 телескопа АЦУ-5 Коуровской обсерватории УрФУ, были проведены спектральные наблюдения активных петельных систем на лимбе Солнца в линиях ионизованного кальция H и K CaII, с разрешением 0.03 Å/пиксел. В данной работе представлены наблюдения от 9 июля 2012 г., в результате которых были получены ПЗС-изображения эмиссионных линий H и K CaII в петельных системах двух активных областей (AR): AR 1513 (в северной полусфере Солнца) и AR 1515 — в южной. Обе эти AR располагались на низких широтах, вблизи одного и того же меридиана и 9.07.12 находились на западном лимбе Солнца. Это взаимодействующие AR, они были соединены «мостом» (арками магнитных силовых линий), перекинутым через солнечный экватор. По данным GOES, в этих AR с 29 июня по 8 июля произошло 14 рентгеновских вспышек среднего балла (M1 — M6) и вспышка высокого балла X1.

1. Наблюдавшаяся эмиссия линий H и K CaII многокомпонентна (яркие узлы, дуги, наклон к дисперсии). Отмечены быстрые изменения структуры и яркости компонент (с временным разрешением 25 с — 2.0 мин). Скорости выбросов в плоскости, параллельной лимбу, достигают значений 140 км/с.
2. Интенсивность ярких узлов в вершинах петель в нескольких случаях была более высокой, чем в подножии петель. Показано, что ядра наибольшей интенсивности внутри ярких узлов в вершинах петель имеют протяженность не более 300 км.
3. В наиболее ярких частях петель, в крыльях H CaII, иногда обнаруживается линия 6939.4 FeII, которая не показывает доплеровских сдвигов в отличие от расположенных рядом в спектре ярких узлов H CaII. Возможно, это излучение возникает не в петлях, а в окружающей короне.

ОТКРЫТИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ БЛЕСКА НЕПРАВИЛЬНОГО ТИПА У ВЕРОЯТНЫХ МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ОКРЕСТНОСТИ V645 Cyg

В процессе разработки программы исследований молодых объектов в областях звездообразования была проведена обработка массива ПЗС-кадров, полученного на основе полугодового фотометрического мониторинга молодой аккрецирующей переменной V645 Cyg на телескопе АЗТ-3 Коуровской обсерватории Уральского федерального университета, на которых зарегистрирован участок неба поперечником $40'$, содержащий ряд инфракрасных источников, предположительно являющихся молодыми звездными объектами.

Было выполнено фотометрическое исследование ряда таких объектов в оптическом диапазоне (фильтры V и R), блеск которых укладывался в рабочий диапазон отсчетов ПЗС-кадров, полученных с экспозициями, подобранными под блеск V645 Cyg. Целью исследования было обнаружение источников, проявляющих характерную для молодых звездных объектов переменности блеска неправильного типа. Всего для исследования были отобраны 16 объектов, имеющих значительный инфракрасный избыток. Два из них являются точечными источниками IRAS.

В результате у 6 звездных источников, включая оба источника IRAS, на интервале времени 1.5 года была зарегистрирована переменность блеска неправильного типа в фильтрах V и R с амплитудами, лежащими в пределах $0.3\text{--}1.0^m$. Изменения блеска остальных исследованных объектов не превышали значений $0.02\text{--}0.03^m$.

«БАБОЧКА» МАУНДЕРА 24-го ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В работе представлены результаты визуальных наблюдений фотосферы Солнца в клубе «Парсек», которые проводятся с 1 января 2008 г. За эти годы удалось освоить методику профессионалов ГАС Кисловодска по наблюдению солнечных пятен в телескоп-рефлектор «Мицар» и достичь точности определения координат пятен с погрешностью всего $\pm 1^\circ$, освоить расчет чисел Вольфа. С 1 января 2011 г. перешли на обработку результатов с американского спутника SOHO. Таким образом была обработана информация по солнечной активности за 2011–2012 гг. Цель работы — собрать информацию по солнечной активности за 2011–2012 гг., построить графики изменения чисел Вольфа, сравнить результаты в числах W за пять лет наблюдений, составить таблицу (группа—дата—широта) и построить «бабочку» Маундера. В работе представлено несколько графиков изменения количества солнечных пятен, их площадь (по северному и южному полушариям) и чисел Вольфа за 2011 и 2012 гг. В них просматривается картина явного увеличения солнечной активности (с. а.) в течение 2011 г. Причем четко видны два максимума с. а.: первый в марте—апреле ($W = 80$), а второй в ноябре ($W = 130$)! Все это происходило с явным преобладанием активности северного полушария и слабой активностью южного. Однако с начала 2012 г. Солнце неожиданно начало показывать низкие значения месячного числа Вольфа. Самый глубокий провал 2012 г. наблюдался в феврале, число Вольфа тогда составило 50. С начала года индекс ни разу не превысил 100. В середине года активность стабилизировалась, а среднее значение чисел W за 2012 г. составило 84, фактически оставшись на уровне 2011 г. За 24 прошедших цикла, наблюдались максимумы активности на уровне 200 и даже 250 единиц. По итогам наблюдений солнечной активности за пять лет удалось построить «бабочку» Маундера первой половины 24-го цикла. Если подводить итоги за пять лет наблюдений, то можно сказать, что замечен вялотекущий рост средних значений чисел W : 2008 — 2.3; 2009 — 3.8; 2010 — 28.8; 2011 — 78.6; 2012 — 84.

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ МОЛОДЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Представлены результаты трехмерного газодинамического моделирования структуры течения вещества во внутренних частях протопланетных дисков молодых двойных систем. Показано, что при сверхзвуковом движении компонентов системы перед аккреционными дисками формируются отошедшие ударные волны, которые определяют структуру течения в диске. Установлено, что в результате перераспределения углового момента вещества на фронте отошедшей ударной волны происходит разделение вещества на два потока: аккреционный и декреционный. Поток вещества к околос звездным аккреционным дискам определяется силой отошедшей ударной волны; поскольку, маломассивный компонент движется с большей скоростью, то подходящий к нему поток будет больше. В то время как анализ темпов аккреции показывает, что в результате перераспределения потоков вещества между компонентами системы темп аккреции больше на массивный компонент.

Предложена физическая модель, объясняющая механизм формирования околос звездных аккреционных дисков, имеющих реверсное направление вращения относительно молодой двойной звезды, окруженной протопланетным диском. В рамках предложенной модели объяснены характерные особенности течения вещества в RW Aur: высокий темп аккреции, малый размер диска массивного компонента, а также его реверсное направление вращения.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН П-21, РФФИ (проекты 11-02-00076, 12-02-31438), Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-3602.2012.2), грантом Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-980.2012.2 и Министерством образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.

**Фундаментальные вопросы
исследования и классификации
тесных двойных систем
в эпоху HIPPARCOS-GAIA**

Сопутствующий научный семинар,
посвященный 80-летию со дня рождения
Мария Анатольевича Свечникова



Фундаментальные вопросы исследования и классификации тесных двойных систем в эпоху HIPPARCOS-GAIA

**Сопутствующий научный семинар, посвященный 80-летию
со дня рождения Мария Анатольевича Свечникова**

Организаторы

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра астрономии и геодезии
Астрономическая обсерватория

28 января — 1 февраля 2013 г.

Екатеринбург, Россия

Организационный комитет:

П. Е. Захарова (председатель, Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета), Г. Н. Дремова (Российский федеральный ядерный центр — ВНИИТФ), Е. А. Аввакумова (Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета), С. Ю. Горда (Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета), Э. Д. Кузнецов (Уральский федеральный университет), Т. С. Полушина (Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета), Е. И. Старицин (Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета)

Финансовая поддержка

«Фонд “Династия”»

Уральский федеральный университет

ИНФОРМАЦИЯ О СЕМИНАРЕ

Значительная часть работ в области физики космоса направлена на исследование тесных двойных систем (ТДС). ТДС являются основным источником информации о фундаментальных характеристиках звезд, массах, радиусах, светимостях, распределении плотности в их недрах. Эти знания позволяют тестировать теорию внутреннего строения звезд, которая не может опираться на данные прямых наблюдений звездных недр, а базируется на основных положениях теории химической эволюции звезд и теории нуклеосинтеза. Систематизация звезд по свойствам, общность которых отражает одни и те же физические процессы, протекающие в звездных системах одного и того же класса фиксируется с помощью классификации ТДС. Статистический анализ изменения свойств звезд от класса к классу помогает зафиксировать направление звездной эволюции и проверить прогнозируемые генетические связи классов в рамках концепции популяционного синтеза на основе количественного анализа истинных численностей ТДС тех классов, которые подозреваются на генетическое родство, и продолжительность существования этих классов. Экспоненциальный рост наблюдательных данных, повышение и расширение их качественного уровня зарождают новую концепцию каталогов, компиляция которых должна быть объединена с теоретическими результатами численного моделирования. Успешно завершающийся космический проект HIPPARCOS и подготовка ESA к 2013 г. нового астрометрического проекта GAIA показывает, что прогнозируемые объемы данных невозможно осмыслить без методов математической статистики и принципов классификации. В России активно действуют группы, занимающиеся исследованием ТДС как в области теории (ИНАСАН, ГАИШ МГУ, САО, СПбГУ, КФУ), так и в области наблюдений, интерпретации и статистической обработки (ГАИШ МГУ, САО, КФУ, УрФУ, ГАО РАН). К исследованиям широко привлекаются студенты и аспиранты.

Семинар включает темы:

- фундаментальные проблемы в исследовании образования и эволюции тесных двойных систем (ТДС);
- критерии современной классификации тесных двойных систем;
- роль методов статистической астрономии в осмыслении современных объемов данных наблюдений.

Семинар включает:

- обзорные лекции признанных специалистов, посвященные эволюции ТДС;
- обзорные лекции признанных специалистов, по моделированию наблюдаемых фотометрических и спектроскопических явлений в ТДС;
- обзорные лекции признанных специалистов в области статистической астрономии, позволяющей систематизировать современные большие объемы информации в области ТДС с целью дальнейшего его использования в вопросах эволюции звезд и в более широких вопросах.
- доклады молодых ученых и аспирантов, активно участвующих в исследованиях ТДС;
- дискуссию, посвященную обсуждению основных современных проблем в области исследования ТДС.

МАРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ СВЕЧНИКОВ

Родился 28 января 1933 г. в Одессе.

Доктор физико-математических наук (1987), профессор (1988).

Окончил Ленинградский университет (1954).

Был главным научным сотрудником Коуровской астрономической обсерватории Уральского университета (1993—2009).

С 1964 г. Марий Анатольевич работал в Уральском университете. С 1987 г. — доктор физико-математических наук, с 1987 г. — профессор, М. А. Свечников являлся одним из лучших лекторов на физическом факультете. Он подготовил и много лет читал лекционные курсы «Теоретическая астрофизика», «Дополнительные главы теоретической астрофизики», «Переменные звезды», «Общая астрофизика», «Общая астрономия» (для физиков), «Методы размерностей и подобия», курс «Физика и эволюция звезд» для студентов математической специальности, курс «Физика Космоса» для студентов физического факультета, курс «Основы естествознания» для гуманитарных и общественных факультетов, курсы «Проблемы современной астрофизики», «Физическая география и геофизика в естествознании» для студентов педагогических вузов.

С декабря 1972 по март 1976 г. М. А. Свечников находился в командировке в Алжирской Народной Республике, где читал два лекционных курса на французском языке — «Практическая астрофизика» и «Теоретическая астрофизика», а также факультативы и обзорные лекции для физического и других естественных факультетов университета. В Алжире он все свободное время отдавал восстановлению алжирской обсерватории и подготовке ее персонала.

С 1979 по 1993 г. М. А. Свечников работал в Челябинском государственном университете, где им прочитаны лекции «Астрофизика», «Термодинамика», «Теория размерностей и подобия». Он активно занимался научной работой по теме «Статистические исследования тесных двойных звезд». До 1999 г. Марий Анатольевич продолжал работать в Челябинском университете по совместительству.

Научная деятельность М. А. Свечникова посвящена изучению тесных двойных систем разных типов. Им совместно с учениками составлены каталоги орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд (1969, 1987), двухтомный каталог приближенных элементов затменных переменных звезд (1990). Он впервые определил вероятности открытия тесных двойных систем различных

типов как затменных переменных звезд (1984—1992). Оценил пространственную плотность тесных двойных систем различных типов в окрестностях Солнца (1987—1993). Уточнил различные фундаментальные статистические зависимости, связывающие массы со светимостью, спектром, радиусом и другими параметрами для звезд главной последовательности и субгигантов, которые широко использовались при изучении одиночных звезд. Марием Анатольевичем была разработана классификация тесных двойных звезд (1969), которая объединила в себе достоинства классификации Копала, учитывающей в основном геометрические характеристики систем и классификации Крата, основанной главным образом на физических характеристиках компонент, входящих в затменную систему. Его классификация оказалась связанной с эволюционными стадиями затменных систем, определяемыми возрастом, начальными массами компонент и размерами системы. Она легла в основу современной классификации, используемой в Общем Каталоге Переменных Звезд.

Марий Анатольевич Свечников был руководителем научного направления по статистическим исследованиям тесных двойных систем. Им опубликовано 5 методических пособий, 170 научных работ в отечественной и зарубежной печати, среди публикаций — 7 монографий. Его «Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд» широко используется в астрономических исследованиях во всем мире, его каталоги переданы в Страсбургский центр научной информации. Под руководством М. А. Свечникова подготовлены и защищены 10 кандидатских диссертаций.

Марий Анатольевич был активно связан совместной научной и педагогической работой с кафедрой теоретической физики Челябинского госуниверситета, Астрономическим институтом им. П. К. Штернберга, Санкт-Петербургским университетом, Пулковской обсерваторией РАН, Специальной астрофизической обсерваторией РАН, Читинским педуниверситетом, Эстонской академией наук, Узбекской академией наук, Крымской астрофизической обсерваторией Национальной академией наук Украины, Карагандинским педагогическим университетом.

Монографии М. А. Свечникова :

Свечников М. А. Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд. Свердловск, 1969.

Свечников М. А., Снежско, Л. И. Характеристики и эволюция тесных двойных систем. Явления нестационарности и звездная эволюция. М., 1974.

Свечников М. А. Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд. Иркутск, 1986.

Свечников М. А., Кузнецова Э. Ф. Каталог приближенных относительных и абсолютных элементов затменных переменных звезд : в 2 т. Свердловск, 1990 (Т. 1 — 224 с., т. 2 — 232 с.).

Свечников М. А. Статистические исследования тесных двойных звезд // Публикации Тартус. астрофиз. обсерватории. 1990. № 106.

Свечников М. А., Горда С. Ю, Дремова Г. Н., Перевозкина Е. Л., Еретнова О. Б. Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей затменных переменных звезд типа РГП и некоторые результаты его статистической обработки. Екатеринбург, 1999.

Обзорные лекции семинара

Э. А. Антохина

Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга

СИНТЕЗ КРИВЫХ БЛЕСКА И КРИВЫХ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС ЗВЕЗД И РЕЛЯТИВИСТСКИХ ОБЪЕКТОВ

Методы синтеза кривых блеска и кривых лучевых скоростей тесных двойных систем позволяют надежно определять фундаментальные характеристики звезд и релятивистских объектов. Мы приводим результаты анализа кривой блеска двойной системы HD 93025, содержащей массивные звезды ранних спектральных классов, и результаты анализа рентгеновских кривых блеска уникального объекта SS433, полученные космической обсерваторией INTEGRAL. Также приводятся результаты моделирования теоретических профилей линий поглощения и кривых лучевых скоростей оптических звезд в рентгеновских двойных системах.

Light and radial velocity curves synthesis methods for close binary systems allow one to reliably determine fundamental parameters of stars and relativistic objects. We present the results of light curve analysis, which allows us to determine stellar masses for interesting massive binary system containing massive early type components HD 93205 and the results of X-ray light curves analysis of the unique object SS433 obtained by the INTEGRAL space observatory. We also present modeling of theoretical absorption-line profiles and radial velocity curves of optical components in X-ray binary systems.

Введение

Исследование тесных двойных систем звезд (ТДС) — один из важнейших разделов современной астрофизики. Во-первых, значительное количество звезд входят в двойные системы. Так, по современным оценкам, не менее 50 % звезд нашей Галактики входят в

двойные или кратные системы. Во-вторых, двойные системы являются основным и самым надежным источником информации о фундаментальных параметрах звезд — их массах, размерах и светимостях. Из исследования двойных звезд возможно прямое определение масс звезд, даже если неизвестно расстояние до них. В-третьих, компонентами ТДС являются такие интереснейшие астрофизические объекты, как звезды Вольфа—Райе, белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры.

Наибольшую ценность представляют ТДС, которые одновременно являются затменными переменными и спектроскопическими двойными, то есть из наблюдений можно получить как кривую блеска в течение орбитального периода, так и кривые лучевых скоростей двух компонентов. Тогда из кривых лучевых скоростей можно определить значения масс и полуосей орбит с точностью до угла наклона орбиты. А из кривой блеска можно определить относительные размеры компонент, отношение их светимостей и угол наклона орбиты. Используя эти значения совместно с решением кривых лучевых скоростей, можно найти абсолютные параметры звезд — массы, радиусы, светимости. Но такие системы встречаются, к сожалению, достаточно редко. Часто в спектре видны линии лишь одной звезды, так как она более яркая, или в двойной системе не наблюдаются затмения. В этом случае определение достоверных параметров компонентов ТДС представляет собой сложную и неоднозначную задачу.

В 1950-е гг. были разработаны методы анализа классических двойных систем, например, известный метод Расселла—Меррилла [1], с которым были получены параметры многих двойных звезд. Но метод Расселла—Меррилла подходит только для ограниченного количества так называемых «классических» двойных систем, в которых форма звезд близка к шару. В процессе эволюции звезда в двойной системе увеличивается в размерах, из-за приливных деформаций ее форма становится эллипсоидальной или даже «грушевидной» и описывается сложной эквипотенциальной поверхностью в модели Роша [2]. Распределение температуры на поверхности звезды неоднородно вследствие эффектов гравитационного потемнения, потемнения к краю и эффекта прогрева излучением спутника («эффект отражения»). Особенно сильно эффект «отражения» влияет на наблюдательные проявления рентгеновских ТДС, когда поверхность звезды может быть сильно прогрета рентгеновским излучением релятивистского объекта. Во взаимодействующих ТДС часто существуют околозвездные газовые структуры — диски, струи,

общие оболочки и т. д. Таким образом, для корректного анализа наблюдений взаимодействующих двойных систем требуется применение неклассических методов, которые бы позволили учитывать вышеперечисленные эффекты близости компонентов ТДС и корректно определять их параметры.

Новые методы появились в начале 1970-х гг. благодаря быстрому прогрессу электронно-вычислительной техники и стали называться методами синтеза. Они были предложены независимо несколькими авторами [3–5], в настоящее время наиболее широко используется комплекс программ Вилсона—Девиннея [4, 6].

В нашей стране методы синтеза начали разрабатываться в конце 70-х гг. в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга [7–9]. К настоящему времени в ГАИШ создан целый комплекс программ для анализа кривых блеска различных типов двойных систем: ТДС в модели Роша на круговой и эллиптической орбитах [10, 11], модель рентгеновской системы [8], модель с оптически толстым диском [10], с прецессирующим диском и джетами [12, 13], с пятнами на поверхности звезд [14], со струями перетекающего вещества [15] и т. д. С использованием этих вычислительных алгоритмов был выполнен анализ десятков ТДС и получены физические параметры их компонентов.

Основная идея методов синтеза состоит в том, что сложные поверхности приливо искаженных звезд в двойной системе разбиваются на тысячи элементарных площадок. Для каждого элемента поверхности вычисляется выходящий поток излучения. Затем в различных фазах орбитального периода эти потоки интегрируются с условием видимости площадок и проверки затмений, в итоге получается суммарный поток излучения от системы на разных фазах — кривая блеска. При этом учитываются эффекты гравитационного потемнения, потемнения к краю, эффект «отражения». Сравнивая теоретические кривые с наблюдениями и решая обратную задачу, можно определить важнейшие параметры компонентов: массы, радиусы, светимости и др.

На рис. 1, 2 показаны компьютерные модели, использовавшиеся нами для анализа наблюдений двойных систем разных типов. Здесь мы приведем результаты анализа кривых блеска двух интересных двойных систем HD 93205 и SS433.

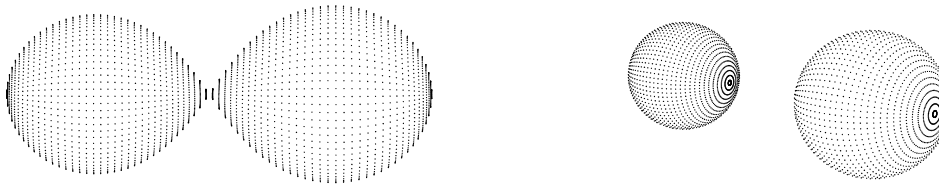


Рис. 1. Двойная система в модели Роша: слева — звезды заполняют критические эквипотенциальные поверхности, справа — звезды далеки от заполнения критических эквипотенциальных поверхностей

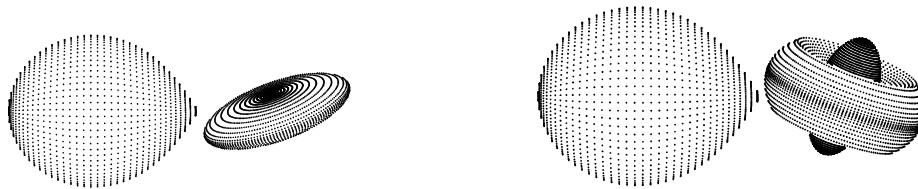


Рис. 2. Модель двойной системы с прецессирующим диском (слева), использовалась для анализа оптических наблюдений SS433. Модель двойной системы с прецессирующим диском и джетами (справа), использовалась для анализа рентгеновских наблюдений SS433

Анализ кривых блеска HD 93205

Большой интерес представляет определение масс наиболее массивных звезд; их надежные оценки можно получить для звезд, входящих в двойные системы. Одна из самых ранних известных звезд в ТДС — звезда спектрального класса O3V — является компонентом системы HD 93205 (O3V+O8V). Эта двойная система находится в молодом рассеянном скоплении Trumpler 16 в составе Great Carina Nebular, орбитальный период системы $P = 6.08$ дня. HD 93205 спектроскопическая двойная с большим эксцентриситетом орбиты ($e = 0.46$). Для звезд системы были получены кривые лучевых скоростей и определены функции масс и отношение масс $q = 0.445$ (звезда O3V более массивная) [16]. Для окончательного определения масс звезд требовалось определение наклонения орбиты системы i , которое можно найти из кривой блеска.

Кривая блеска для этой ТДС не была известна, было лишь заподозрено что у нее существует очень слабая фотометрическая пе-

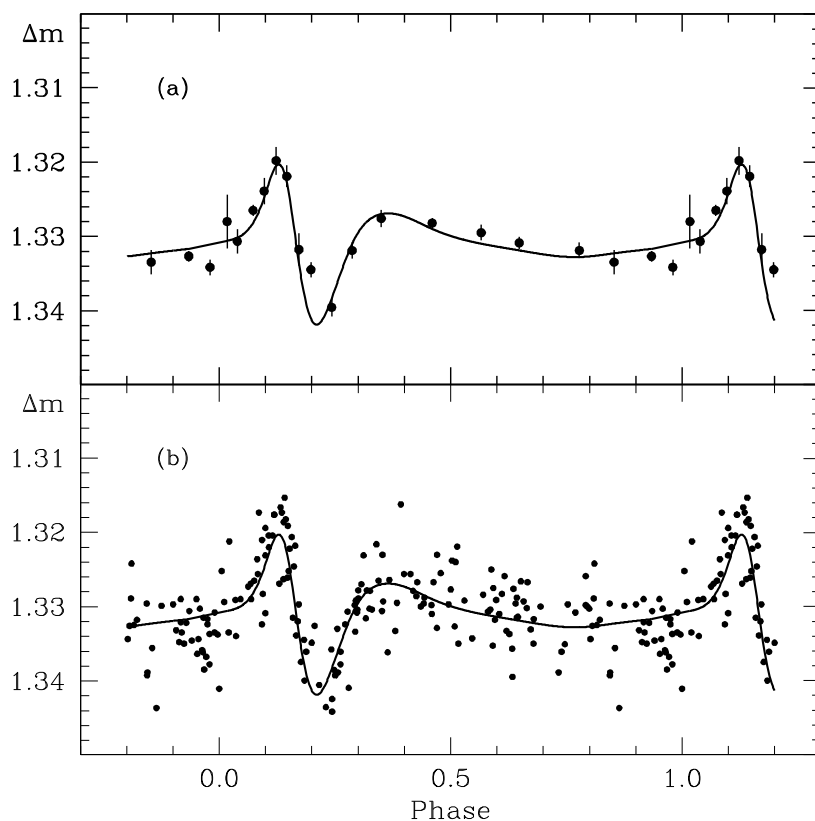


Рис. 3. Кривые блеска системы HD 93205. Приведена модельная кривая блеска в сравнении со средней кривой блеска (a) и с индивидуальными наблюдениями (b). Амплитуда кривой блеска составляет всего 0.02^m

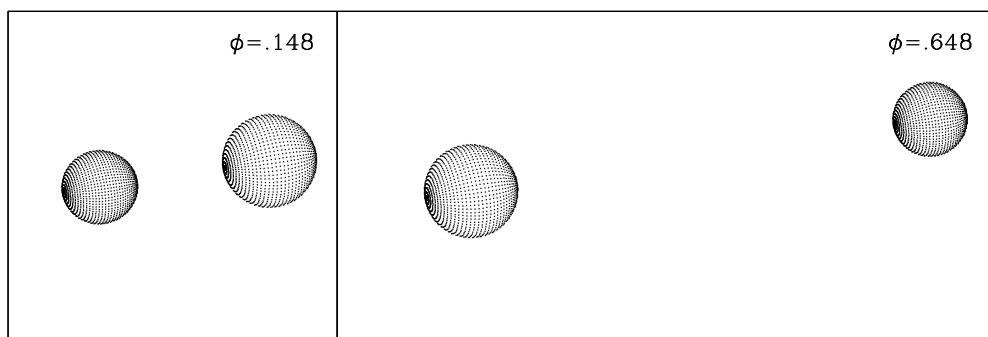


Рис. 4. Модель двойной системы HD 93205: слева — момент периастра, справа — момент апоастра. Приливные деформации звезд при движении по эллиптической орбите ответственны за необычную форму кривой блеска HD 93205

ременность. В результате интенсивной высокоточной фотометрии на обсерватории Сьерро-Тололо в Чили [17] была получена кривая блеска очень малой амплитуды и необычной формы (рис. 3). Наш анализ этой кривой блеска методом синтеза в модели Роша показал, что значение наклона орбиты близко к $i = 60^\circ$ и в системе нет затмений. Наблюдаемая переменность блеска связана только с малыми приливными деформациями звезд в течение орбитального движения по эллиптической орбите (рис. 4). При найденном наклоне орбиты были сделаны оценки абсолютных параметров звезд: масс, радиусов, температур и светимостей. Найденные массы звезд составляют $45 M_\odot$ (звезда O3V) и $20 M_\odot$ (звезда O8V) [17].

Рентгеновские кривые блеска объекта SS433

Массивная затменная рентгеновская двойная система SS433 состоит из звезды-донора и компактного объекта, окруженного сверхкритическим прецессирующим аккреционным диском. Из диска вырываются два тонких коллимированных релятивистских джета ($v = 0.26 c$), прецессирующих в пространстве. Двойная система показывает несколько типов переменности, главные из них — орбитальная переменность ($P = 13.08$ дня) и прецессионная переменность ($P = 162$ дня). В течение 30 лет с момента открытия этого уникального объекта его активно исследуют в оптическом, радио- и рентгеновском диапазонах [18]. Главной загадкой системы остается природа релятивистского объекта, сверхкритический режим аккреции на который приводит к возникновению сильно-коллимированных джетов. Определение массы компактного объекта необходимо для заключения, является ли компактный объект черной дырой или нейтронной звездой. В SS433 очень трудно определить массы компоненты напрямую из спектроскопии, так как спектр системы содержит в основном сильные линии яркого аккреционного диска, а спектральные линии звезды очень слабые и трудно идентифицируются. Поэтому большую роль играет анализ кривых блеска в разных диапазонах.

История наших попыток определения отношения масс в системе SS433 (и затем масс компонентов) с использованием методов синтеза кривых блеска началась в середине 1980-х гг. Были проанализированы оптические кривые блеска для различных фаз прецессии в модели со сфероидальным толстым диском [12]. Расчеты в широком диапазоне параметров звезды и диска позволили заключить, что наблюдения удовлетворительно аппроксимируются для двух значений

отношения масс: $q = 0.4$ и $q = 1.2$. Здесь $q = M_x/M_v$, где M_x — масса релятивистского объекта; M_v — масса звезды-донора. На основании анализа оптических кривых блеска было сделано заключение, что компактный объект является черной дырой [12].

В начале 1990-х гг. были проанализированы рентгеновские данные, полученные на спутнике GINGA в диапазоне 1—10 кэВ [19]. Для анализа рентгеновских затмений был написан новый алгоритм [13] с реализацией модели с прецессирующим геометрически толстым диском с «воронкой» и джетами, погруженными в «воронку» (см. рис. 2). Анализ рентгеновских данных для трех фаз прецессии показал, что форма и продолжительность рентгеновских затмений могут быть удовлетворительно аппроксимированы при отношениях масс в системе $q = 0.15$ — 0.25 [13], что соответствует гипотезе о нейтронной звезде в SS433. Таким образом, возникло противоречие с результатами более раннего анализа оптических кривых блеска [12].

Это противоречие удалось преодолеть после запуска орбитальной рентгеновской и гамма-обсерватории INTEGRAL. Первые наблюдения в 2003 г. показали, что SS433 является источником жесткого рентгеновского излучения с энергиями до 100 кэВ. Была обнаружена сильная прецессионная переменность жесткого излучения и открыты глубокие и широкие затмения в рентгеновском диапазоне в моменты, когда аккреционный диск затмевается оптической звездой. Анализ полученных данных позволил предположить, что источником жесткого рентгеновского излучения является протяженная горячая «корона», окружающая основания релятивистских джетов [20].

Наблюдения главного минимума SS433 в диапазоне 18—60 кэВ на спутнике INTEGRAL были получены в 2003—2008 гг. вблизи момента T_3 прецессионной переменности (момент максимального раскрытия аккреционного диска в направлении наблюдателя). Всего были получены пять сетов наблюдений главного минимума (рис. 5). В главном минимуме звезда затмевает сверхкритический аккреционный диск и «корону» у основания джетов. Для анализа новых рентгеновских затмений SS433 мы использовали модель, уже применявшуюся для анализа рентгеновских данных со спутника GINGA [13].

Рассматривается тесная двойная система, состоящая из «нормальной» звезды, форма которой определяется эквипотенциальной поверхностью в модели Роша, и релятивистского объекта, окруженного геометрически толстым аккреционным диском (см. рис. 2). Диск и джеты прецессируют в пространстве, меняя свою ориента-

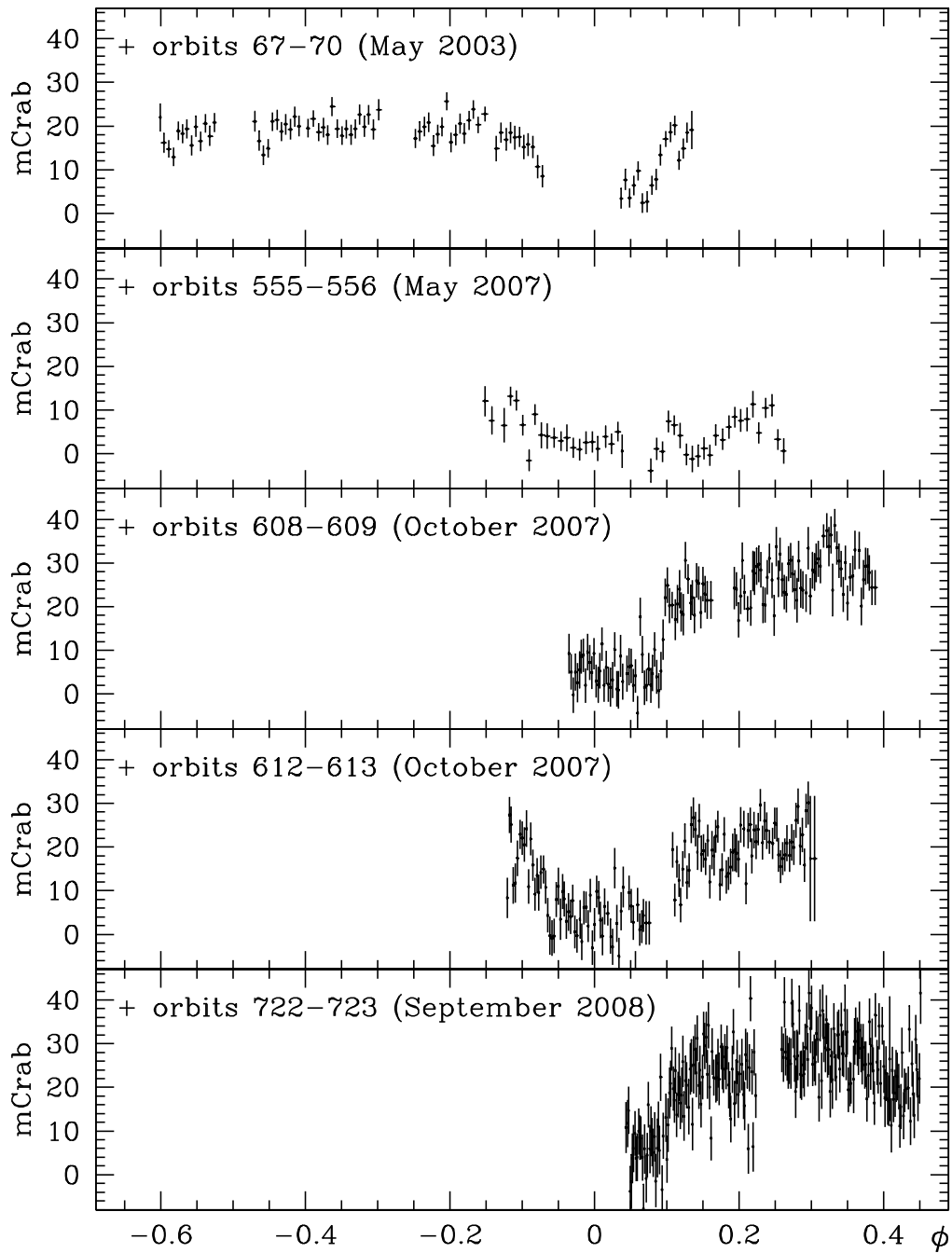


Рис. 5. Рентгеновские затмения SS433 в главном минимуме, полученные обсерваторией INTEGRAL в диапазоне 18–60 кэВ в 2003–2008 гг.

цию относительно звезды. Центральный объект окружен прозрачным квазиизотермическим однородно излучающим сфероидом, который интерпретируется как «корона». Предполагается, что в жестком рентгеновском диапазоне излучают только «корона», которую звезда и диск затмевают в процессе орбитального и прецессионного

движения. При прецессионном движении условия видимости «короны» меняются. Совместный анализ прецессионной переменности и орбитальных затмений дает возможность реконструировать пространственную структуру аккреционного диска и его центральной области и оценить отношение масс q .

Расчеты показали [20, 21], что при $q = 0.3$ — 0.5 модельные кривые блеска достаточно хорошо описывают как орбитальную, так и прецессионную переменность SS433 в жестком рентгеновском диапазоне. Было найдено, что экваториальные размеры «короны» близки к размерам диска. Затмение короны краями аккреционного диска при прецессии обеспечивает наблюдаемую прецессионную переменность. Модель двойной системы приведена на рис. 6.

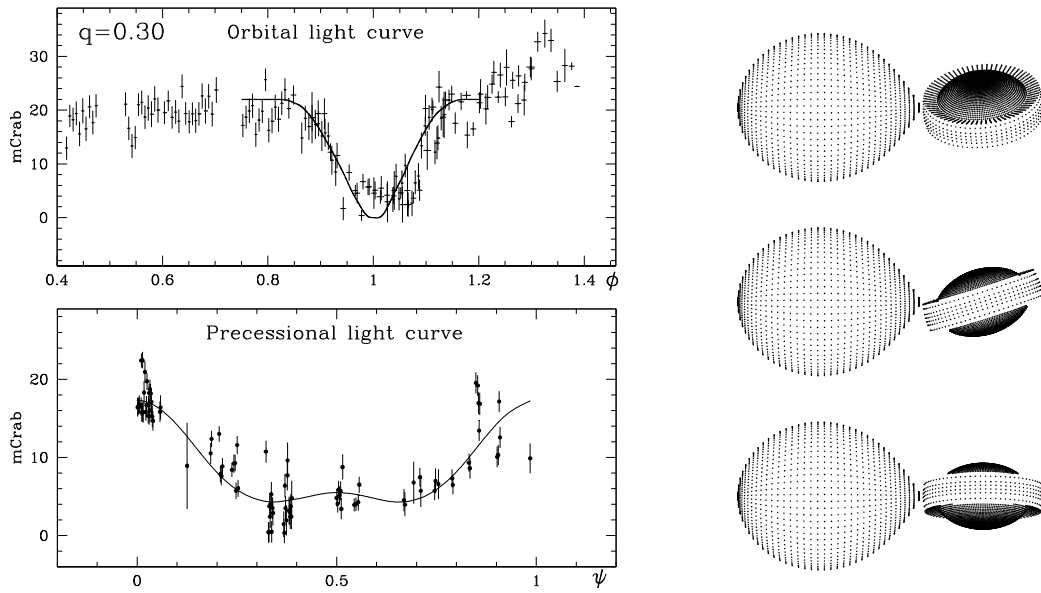


Рис. 6. Орбитальная и прецессионная рентгеновские кривые блеска SS433 (слева), модельные кривые блеска (сплошные линии) для $q = 0.3$ показывают хорошее согласие с наблюдениями орбитальной и прецессионной переменности. Модель SS433 (справа), приведены три фазы прецессионного периода, демонстрирующие изменение ориентации диска в пространстве

С использованием функции масс звезды-донора, найденной Хиллвигом и Гизом, $f(m) = 0.26 M_{\odot}$ [22] и полученных нами значений $q = 0.3$ — 0.5 можно оценить массы звезды и компактного объекта: $M_v = 12$ — $20 M_{\odot}$, $M_x = 4$ — $35 M_{\odot}$ соответственно. Таким образом, анализ рентгеновских затмений по данным спутника INTEGRAL позволяет заключить, что с большой вероятностью компактный объект в SS433 является черной дырой [21].

Методы синтеза кривых лучевых скоростей

В настоящее время методы синтеза теоретических кривых блеска широко применяются для анализа наблюдений ТДС. Однако кривые лучевых скоростей по-прежнему часто интерпретируются в простой модели, когда звезды аппроксимируются материальными точками, движущимися по кеплеровским орбитам. Такое приближение может приводить к неверному определению масс компонентов, так как наблюдаемые кривые лучевых скоростей не совсем точно отражают движение центров масс звезд и подвержены влиянию эффектов близости компонентов. Основные эффекты, которые могут искажать форму кривых лучевых скоростей: приливно-вращательная деформация звезды, неоднородное распределение температуры по поверхности, прогрев поверхности падающим излучением спутника, затмения, звездный ветер, эффекты взаимодействия, связанные с околосредными газовыми структурами (диски, струи и др.).

Особенно важен учет близости компонентов для рентгеновских ТДС. В таких системах поверхности звезд сильно приливно деформированы и распределение температур может быть существенно неоднородным из-за сильного рентгеновского прогрева. На это указывали ряд авторов еще в 70-х гг., в эпоху начала рентгеновской астрономии.

Первые расчеты кривых лучевых скоростей и профилей спектральных линий приливно-деформированных звезд в различных приближениях были сделаны Хатчингсом [23], Вилсоном и Софией [24], Милгромом [25] и др. Авторы отмечали актуальность учета эффектов близости компонентов для рентгеновских двойных систем.

Антохина и Черепашук [26] предложили алгоритм вычисления профилей линий и кривых лучевых скоростей приливно-деформированных звезд в ТДС методом синтеза. Звезды рассматривались в модели Роша, в качестве локальных профилей линий элементарных площадок использовались теоретические профили водородных линий для различных значений эффективных температур и ускорений силы тяжести, приведенные в работе Куруца [27]. Эффект «отражения» учитывался в рамках простейшей модели сложения выходящего и падающего потоков без учета переноса внешнего падающего излучения в атмосфере прогреваемой звезды. Такой подход не совсем корректен, он не позволяет учитывать эмиссии, которые могут возникать в линиях при сильном прогреве атмосферы падающим извне излучением. В случае рентгеновских двойных си-

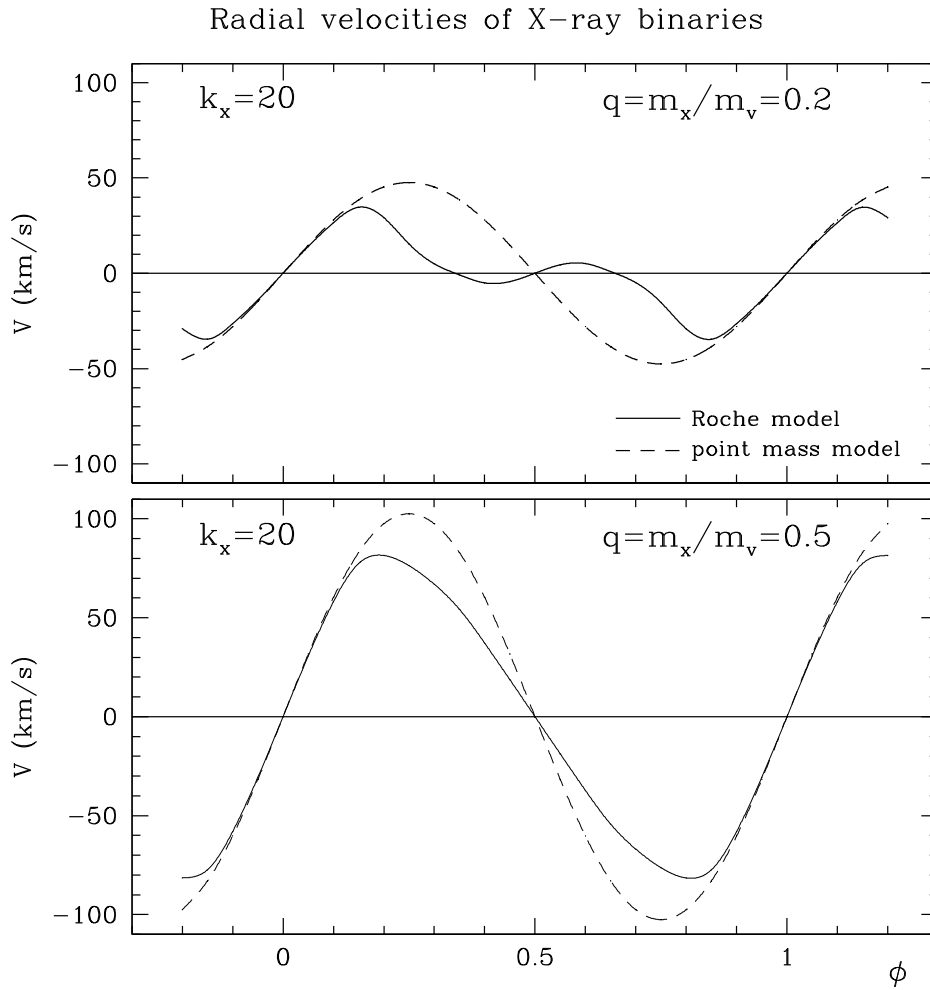


Рис. 7. Влияние деформации звезды и прогрева рентгеновским излучением спутника на кривую лучевых скоростей. Пунктирные линии — кривые лучевых скоростей центров масс звезд. Сплошные линии — модельные кривые лучевых скоростей при коэффициенте рентгеновского прогрева $k_x = 20$. Эффект существеннее при уменьшении q

стем такая модель учета эффекта «отражения» может применяться лишь при малом рентгеновском прогреве. С использованием предложенного алгоритма Антохина и Черепашук [28] выполнили модельные расчеты профилей линий звезд в ТДС (рис. 7) и сделали заключение, что возможно независимое определение значений отношения масс q и угла наклона орбиты двойной системы i по вариациям спектральных профилей линии звезд. Такой же метод определения q и i был независимо предложен Шабазом [29].

Синтез профилей спектральных линий звезд и кривых лучевых скоростей в рентгеновских ТДС на основе расчета модели атмосферы оптической звезды

Новый усовершенствованный алгоритм синтеза профилей линий и кривых лучевых скоростей звезд в рентгеновских ТДС был предложен в 2005 г. Антохиной и др. [30]. Прогрев поверхности звезды падающим рентгеновским излучением от релятивистского объекта и вычисление выходящего излучения проводится путем решения уравнения переноса в данной точке атмосферы звезды. Новый алгоритм позволяет более корректно интерпретировать спектроскопические наблюдения ТДС и получать достоверные физические параметры.

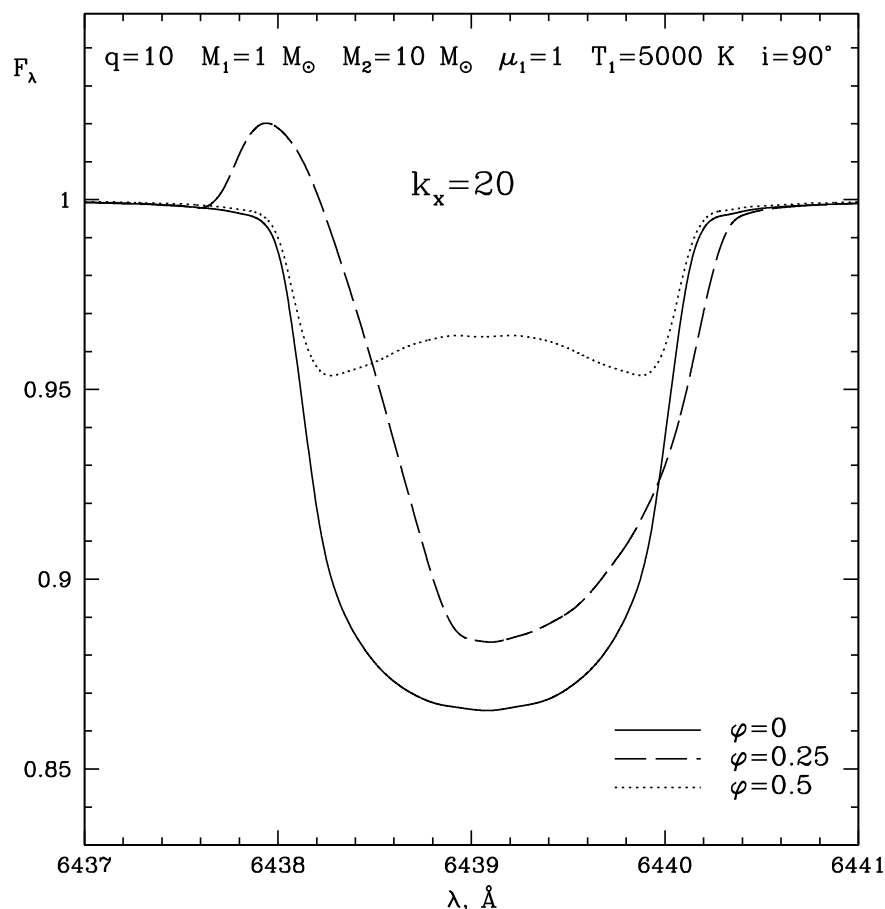


Рис. 8. Вариации профиля линии CaI 6439 в трех фазах орбитального периода. Профиль изменяется в зависимости от видимости прогретой рентгеновским излучением части звезды. В фазе 0 прогретая часть не видна наблюдателю, в фазе 0.5 прогретая часть обращена на наблюдателя

Для каждой элементарной площадки на поверхности звезды вычисляются локальные значения температуры T , ускорения силы тяжести $lg(g)$ и локального параметра облучения K_x^{loc} (он равен отношению падающего рентгеновского потока к выходящему потоку излучения без учета внешнего облучения атмосферы). С этими параметрами вычисляется модель атмосферы площадки и поток выходящего излучения в линии и континууме. Затем для каждой орбитальной фазы вычисляется интегральный профиль линии звезды, который используется для определения лучевой скорости. В работе [30] приведены результаты модельных расчетов профилей линий, их эквивалентных ширин и кривых лучевых скоростей в зависимости от параметров ТДС.

На рисунке 8 показано изменение формы и интенсивности модельных профилей линии в течение орбитального периода при сильном рентгеновском прогреве. Хорошо прослеживается эволюция интегрального профиля линии оптической звезды при повороте звезды к наблюдателю стороной, прогретой рентгеновским излучением спутника. В фазе 0 рентгеновский источник находится сзади, наблюдатель видит непрогретую часть звезды. В фазе 0.25 (квадратура) звезда имеет максимальные размеры в картинной плоскости, видны как непрогретая, так и прогретая части звезды. В фазе 0.5 звезда полностью повернута к наблюдателю стороной, обращенной к рентгеновскому источнику и максимально прогретой его излучением. В тех фазах орбитального периода, где наблюдателю одновременно видны прогретая и непрогретая части звезды, движущиеся с разными скоростями, абсорбционный профиль линии звезды сужается из-за появления эмиссионного компонента. Таким образом, неучет этого фактора может привести к неправильному определению лучевых скоростей звезды, что, в свою очередь, приведет к некорректному определению масс компонентов ТДС.

С новым алгоритмом был выполнен анализ целого ряда рентгеновских ТДС. Перечислим некоторые полученные результаты.

1. Выполнен новый анализ кривых лучевых скоростей оптических звезд в системах Cen X-3, LMC X-4, SMC X-1, 4U 1538-52 и Vela X-1. Сделан вывод, что массы рентгеновских пульсаров, полученные ранее в традиционных моделях двух материальных точек, были недооценены на 5—10 % [31].
2. Выполнен анализ высокоточной кривой лучевых скоростей оптической звезды в массивной рентгеновской двойной системе Cyg X-1. Новая методика позволила только по кривой лучевых

скоростей, не привлекая дополнительной информации о системе, уточнить угол наклона орбиты $i < 43^\circ$ и массу черной дыры $M_x = 9.0\text{--}13.2 M_\odot$ [32].

3. Выполнен анализ маломассивной рентгеновской двойной системы 2S 0921-63 при учете сильного рентгеновского прогрева. Высокоточная кривая лучевых скоростей получена и впервые проанализирована в работе [33]. По оценкам авторов, масса релятивистского объекта $M_x = 1.9\text{--}2.9 M_\odot$, что соответствует массивной нейтронной звезде или маломассивной черной дыре. Выполненный нами анализ лучевых скоростей при учете предполагаемой анизотропии рентгеновского излучения, а также экранирования его диском позволил сделать вывод, что, скорее всего, компактный объект в системе — нейтронная звезда с нормальной массой около $M_x = 1.4 M_\odot$ [34].

Заключение

Методы синтеза кривых блеска и кривых лучевых скоростей позволяют проводить интерпретацию и определять параметры самых разнообразных ТДС в рамках сложных нетрадиционных моделей. Предложенный нами метод расчета профилей линий поглощения для оптических звезд в рентгеновских двойных системах учитывает эффект прогрева атмосферы звезды внешним излучением и позволяет проводить детальный анализ спектров высокого разрешения рентгеновских двойных систем. Таким образом, появляются дополнительные возможности для надежного определения физических характеристик рентгеновских двойных систем и прежде всего масс нейтронных звезд и черных дыр.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-02-00258, а также гранта «Ведущие научные школы» НШ-2374.2012.2.

Библиографические ссылки

1. *Russell H. N., Merrill J. E.* The determination of the elements of eclipsing binaries. — 1952.
2. *Kopal Z.* Close binary systems. — 1959.
3. *Hill G., Hutchings J. B.* The Synthesis of Close-Binary Light Curves. I. The Reflection Effect and Distortion in Algol // *Astrophys. J.* — 1970. — Vol. 162. — P. 265.

4. *Wilson R. E., Devinney E. J.* Realization of Accurate Close-Binary Light Curves: Application to MR Cygni // *Astrophys. J.* — 1971. — Vol. 166. — P. 605.
5. *Wood D. B.* An analytic model of eclipsing binary star systems. // *Astron. J.* — 1971. — Vol. 76. — P. 701–710.
6. *Wilson R. E.* Eccentric orbit generalization and simultaneous solution of binary star light and velocity curves // *Astrophys. J.* — 1979. — Vol. 234. — P. 1054–1066.
7. *Бочкарев Н. Г., Карицкая Е. А., Шакура Н. И.* Расчет эффекта эллипсоидальности в тесных двойных системах с одним оптическим компонентом // *Астрон. журн.* — 1979. — Т. 56, вып. 1. — С. 16.
8. *Балог Н. И., Гончарский А. В., Черепашук А. М.* Интерпретация кривых блеска рентгеновских двойных систем. Система Cyg X-1 // *Астрон. журн.* — 1981. — Т. 58, вып. 1. — С. 67.
9. *Балог Н. И., Гончарский А. В., Метлицкая З. Ю., Черепашук А. М.* Программа синтеза кривых блеска рентгеновских двойных систем // *Переменные звезды.* — 1982. — Т. 21, вып. 5. — С. 695.
10. *Антохина Э. А.* Методы синтеза теоретических кривых блеска тесных двойных систем // *Астрон. журн.* — 1988. — Т. 65, вып. 6. — С. 1164.
11. *Антохина Э. А.* Синтез теоретических кривых лучевых скоростей и кривых блеска для тесных двойных систем с эксцентричными орбитами // *Астрон. журн.* — 1996. — Т. 73, вып. 4. — С. 532.
12. *Антохина Э. А., Черепашук А. М.* SS433: параметры затменной системы с прецессирующим толстым аккреционным диском // *Астрон. журн.* — 1987. — Т. 64, вып. 3. — С. 562.
13. *Антохина Э. А., Сейфина Е. В., Черепашук А. М.* Анализ рентгеновских затмений в SS433 // *Астрон. журн.* — 1992. — Т. 69, вып. 2. — С. 282.
14. *Хрузина Т. С., Черепашук А. М.* Орбитальные кривые блеска двойной системы A0620-00 в модели оптической звезды с пятнами // *Астрон. журн.* — 1995. — Т. 72, вып. 2. — С. 203.
15. *Хрузина Т. С.* Синтез кривых блеска тесных двойных систем. Моделирование спиральных волн в эллиптическом диске вокруг белого карлика // *Астрон. журн.* — 2005. — Т. 82, вып. 10. — С. 783.

16. *Stickland D. J., Lloyd C.* Spectroscopic binary orbits from ultraviolet radial velocities. Paper 13: HD 93205 // The Observatory. — 1993. — Vol. 113. — P. 256—260.
17. *Antokhina E. A., Moffat A. F. J., Antokhin I. I. et al.* Light Curve Solution of HD 93205 (O3 V+O8 V) Containing the Earliest Known Star in a Well-studied Binary // Astrophys. J. — 2000. — Vol. 529. — P. 463—476.
18. *Fabrika S.* The jets and supercritical accretion disk in SS433 // Astrophys. and Space Physics Rev. — 2004. — Vol. 12. — P. 1—152.
19. *Kawai N., Matsuoka M., Pan H.-C., Stewart G. C.* GINGA observations of the X-ray eclipse of SS 433 // Publ. Astron. Soc. Jpn. — 1989. — Vol. 41. — P. 491—507.
20. *Cherepashchuk A. M., Sunyaev R. A., Fabrika S. N. et al.* INTEGRAL observations of SS433: Results of a coordinated campaign // Astron. Astrophys. — 2005. — Vol. 437. — P. 561—573.
21. *Cherepashchuk A. M., Sunyaev R. A., Postnov K. A. et al.* Peculiar nature of hard X-ray eclipse in SS433 from INTEGRAL observations // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2009. — Vol. 397. — P. 479—487.
22. *Hillwig T. C., Gies D. R.* Spectroscopic Observations of the Mass Donor Star in SS 433 // Astrophys. J. Lett. — 2008. — Vol. 676. — P. L37—L40.
23. *Hutchings J. B.* Numerical Methods for Computing Stellar Line-Profiles and Continuum Fluxes // Publications of the Dominion Astrophysical Observatory Victoria. — 1972. — Vol. 14. — P. 59.
24. *Wilson R. E., Sofia S.* Effects of tidal distortion on binary-star velocity curves and ellipsoidal variation // Astrophys. J. — 1976. — Vol. 203. — P. 182—186.
25. *Milgrom M.* Spectroscopic properties of HZ Herculis in model calculations // Astrophys. J. — 1976. — Vol. 206. — P. 869—875.
26. *Антохина Э. А., Черепашчук А. М.* Синтез кривых лучевых скоростей тесных двойных систем // Астрон. журн. — 1994. — Т. 71, вып. 3. — С. 420.
27. *Kurucz R. L.* Model atmospheres for G, F, A, B, and O stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 1979. — Vol. 40. — P. 1—340.

28. Антохина Э. А., Черепашук А. М. Оценка отношения масс компонентов рентгеновской новой по орбитальной переменности линий поглощения // Письма в Астрон. журн. — 1997. — Т. 23, вып. 6. — С. 889.
29. *Shahbaz T.* A new method of determining the inclination angle in interacting binaries // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1998. — Vol. 298. — P. 153—165.
30. Антохина Э. А., Черепашук А. М., Шиманский В. В. Кривые лучевых скоростей и теоретические профили спектральных линий звезд в маломассивных рентгеновских тесных двойных системах // Астрон. журн. — 2005. — Т. 82, вып. 2. — С. 131.
31. Абубекеров М. К., Антохина Э. А., Черепашук А. М. Массы рентгеновских пульсаров в двойных системах с ОБ-сверхгигантами // Астрон. журн. — 2004. — Т. 81, вып. 2. — С. 108—123.
32. Абубекеров М. К., Антохина Э. А., Черепашук А. М. Оценка массы черной дыры и наклона орбиты по кривой лучевых скоростей в рентгеновской двойной системе Cyg X-1 // Астрон. журн. — 2004. — Т. 81, вып. 7. — С. 606—619.
33. *Jonker P. G., Steeghs D., Nelemans G., van der Klis M.* The radial velocity of the companion star in the low-mass X-ray binary 2S 0921-630: limits on the mass of the compact object // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2005. — Vol. 356. — P. 621—626.
34. Абубекеров М. К., Антохина Э. А., Черепашук А. М., Шиманский В. В. Масса компактного объекта в маломассивной рентгеновской двойной 2S 0921-630 // Астрон. журн. — 2006. — Т. 83, вып. 7. — С. 609—619.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ СВЕЧНИКОВА

В лекции дан исторический обзор первых классификационных схем затменно-переменных звезд, на фоне которого демонстрируются достоинства классификационной схемы Свечникова, получившей широкое признание благодаря простоте найденных критериев классификации и ее компактности.

The lecture presents the historical review of first classification schemes of eclipsing variables with the foreground of advantages of classification scheme by Svechnikov being widely appreciated due to simplicity of classification criteria and brevity.

Из истории открытия переменности звезд

О переменности звезд, вероятно, догадывались еще астрономы древности, по крайней мере, исторические названия некоторых звезд косвенно указывают на это. Сегодня мы можем уверенно сказать, что все звезды — переменные, любая звезда в той или иной степени в ходе своей эволюции меняет блеск. Другое дело, если изменения блеска строго периодические. Это заслуживает отдельного внимания и понимания необходимости в классификационной схеме, которая расставила бы объекты переменного блеска по механизмам переменности. Природа переменности богата, но особое место в ней занимают двойные звезды, способные периодически затмевать друг друга.

С того момента, когда Галилео Галилей в 1609 г. направил свой телескоп на небо, стало возможным обнаружение двойственности, и очень скоро систематика этих открытий потребовала их каталогизации. Через 130 лет с момента открытия Джованни Риччоли (1650) первой двойной системы ζ *UMa* (*Мицар*) Христианом Майером в 1781 г. был издан первый каталог визуально-двойных звезд, содержащий 89 пар.

Определение двойной звезды подразумевает единую динамическую систему гравитационно-связанной пары звезд, обращающихся вокруг общего центра масс. Если расстояние между этой парой звезд

сравнимо с их размерами, то такую систему называют *тесной двойной системой* (ТДС).

Первой ТДС, заподозренной итальянским астрономом и математиком Джеминиано Монтанари (1669) в переменности блеска, стала звезда β *Per* (Алголь). Точное значение периода переменности блеска и объяснение этому нашел английский астроном Джон Гудрайк, который и предположил, наблюдая эту звезду с 1782 по 1783 г., механизм периодически случающихся затмений звездных компонентов. Еще через год такую же переменность Гудрайк обнаружил в β *Lyr* и δ *Ser*. Но лишь через полвека, с развитием надежных фотометрических методов, звездная переменность стала изучаться систематически.

Переменность блеска не единственное наблюдательное проявление двойственности, дублирующим таким же свидетельством является переменность лучевых скоростей звездных компонентов. И вновь ζ *UMa* (*Мицар*) и β *Per* (*Алголь*) стали первыми спектроскопическими ТДС, наблюдения которых состоялись в 1889 г. Комбинированное решение фотометрической кривой блеска и спектроскопической кривой лучевой скорости дает нам знание всех элементов орбиты и астрофизических параметров, необходимых для изучения звездных недр.

Понимание внутренней структуры звезды поднимает более сложные проблемы, связанные с эволюцией и многообразием ТДС. Даже фаза первого обмена массой, когда компоненты только заполняют свои полости Роша и вещество звезд начинает свободно перетекать от одной компоненты к другой, столь многовариантна и имеет множество различных представителей среди ТДС, что заслуживает отдельной классификации. И вот эта классификация подобно «лоцману» должна вывести нас на путь однозначной идентификации ТДС во всех их финальных «экзотических» формах звездной эволюции.

Первые классификационные схемы ТДС

Начиная с 30-х гг. XX в. в нашей стране была развернута работа по каталогизации и систематизации переменных звезд, стали издаваться их каталоги. Первым таким каталогом стал *Общий каталог переменных звезд* (ОКПЗ), содержащий данные о 10 930 переменных звездах, составленный Кукаркиным и Паренаго в 1948 г. [1], впоследствии неоднократно дополнявшийся. Переменные звезды по характеру изменения блеска и поддерживающим его механизмам от-

личаются большим разнообразием. Это классические цефеиды, короткопериодические типа *RR Lyr*, долгопериодические переменные типа *Мирь Кита* и полуправильные переменные, взрывные и новоподобные переменные звезды и т. д. Но особое место в этом списке занимают затменно-переменные системы. И первой классификационной схемой, способной идентифицировать эволюционный статус ТДС, стала схема Гапошкина и Пейн-Гапошкиной (1938) [2], которая опиралась только на анализ кривой блеска. Морфологический анализ кривых блеска предусматривал только три типа:

1. ЕА (тип *Алголь*).
2. ЕВ (тип β *Lyr*).
3. ЕW (тип *W UMa*).

Такая схема все многообразие ТДС трактовала как вариации приливной деформации (то есть близость компонентов друг к другу) и отношение их поверхностных яркостей. Физических процессов, протекающих в этих звездах, схема не касалась, но главным ее недостатком была зависимость формы кривой блеска от длины волны наблюдений.

Следующая схема, предложенная Кратом в 1944 г. [3], имела неоспоримые преимущества в своей полноте и в том, что она опиралась на физические характеристики звезд. В ее основу была положена сегрегация компонентов ТДС по спектральным классам, что позволило выделить следующие группы:

1. А — спектральный класс *O—B9*.
2. В — спектральный класс *B0—A9*.
3. С — тип *Алголь*.
4. D — спектральный класс *A0—F9*.
5. Е — спектральный класс *G—M*.
6. F — *субкарлики*.
7. G — *сверхгиганты*.

Серьезным недостатком этой схемы было присутствие в рамках одного класса как стационарных, так и нестационарных ТДС.

Были и другие классификационные схемы, но широкого распространения они не получили. Одна из причин — неполнота схемы, мало вводимых классов. Например, схема Плаута (1953) [4] все известные ТДС разделяет только на три класса:

- обе звезды принадлежат *Главной последовательности* (ГП);
- одна звезда принадлежит ГП;
- обе звезды не принадлежат ГП (подразумевался класс типа *WUMa*).

Очевидно, что второй класс схемы Плаута не способен различить статус второго компонента: это в равной степени может быть и сверхгигант, и гигант, и карлик, и субкарлик.

Аналогичные недостатки свойственны классификации Копала (1955) [5], выполненной исходя из анализа степени наполнения полостей Роша компонентами ТДС. Положенный в основу схемы чисто геометрический критерий позволял разделить все ТДС также только на три класса:

- *разделенные*;
- *полуразделенные*;
- *контактные*.

Но эта схема не способна различить ТДС с разделенными компонентами, принадлежащими ГП, от систем типа *AR Lac*, компоненты которой также разделены, но являются субгигантами, или классические «алголи» от ТДС с разделенным субгигантом, а также от короткопериодических полуразделенных систем типа *R CMa*. Третий класс смешивает контактные ТДС ранних спектральных классов и контактные типа *W UMa*.

Другая причина непопулярности первых схем, наоборот, их громоздкость, причем выбранные критерии схемы еще не гарантируют однородности класса. Например, классификация Сахадэ (1960) [6], в которой даже предусмотрен класс ТДС с компонентами, находящимися в стадии до выхода на ГП, для которого пока нет наблюдательных подтверждений.

К концу 60-х гг. XX в. вновь была сделана попытка найти более совершенную классификационную схему, которая бы сочетала в себе достоинства прежних схем и не страдала бы их недостатками. Такая схема была построена Свечниковым и его коллегами [7], простота и удобство применения очень скоро принесли ей международное признание.

Карточный каталог Свечникова

Критерии новой классификации

В основе любой классификационной схемы лежат данные наблюдений. Поэтому первоначально задача состояла в сборе этих данных и их систематизации. Именно к такой работе приступил Марий Анатольевич Свечников в 1962 г. На каждую затменную переменную звезду, данные наблюдения которой были доступны в научной литературе, Марий Анатольевич заводил «карточку» (рис. 1), на которую заносились название звезды, ее относительные и абсолютные элементы орбиты, астрофизические параметры (если таковые были известны), а также фамилии и инициалы авторов статьи и ее выходные данные. Так стали появляться первые очертания карточного каталога. К 1968 г. затменных переменных в этом каталоге насчитывалось уже 474.

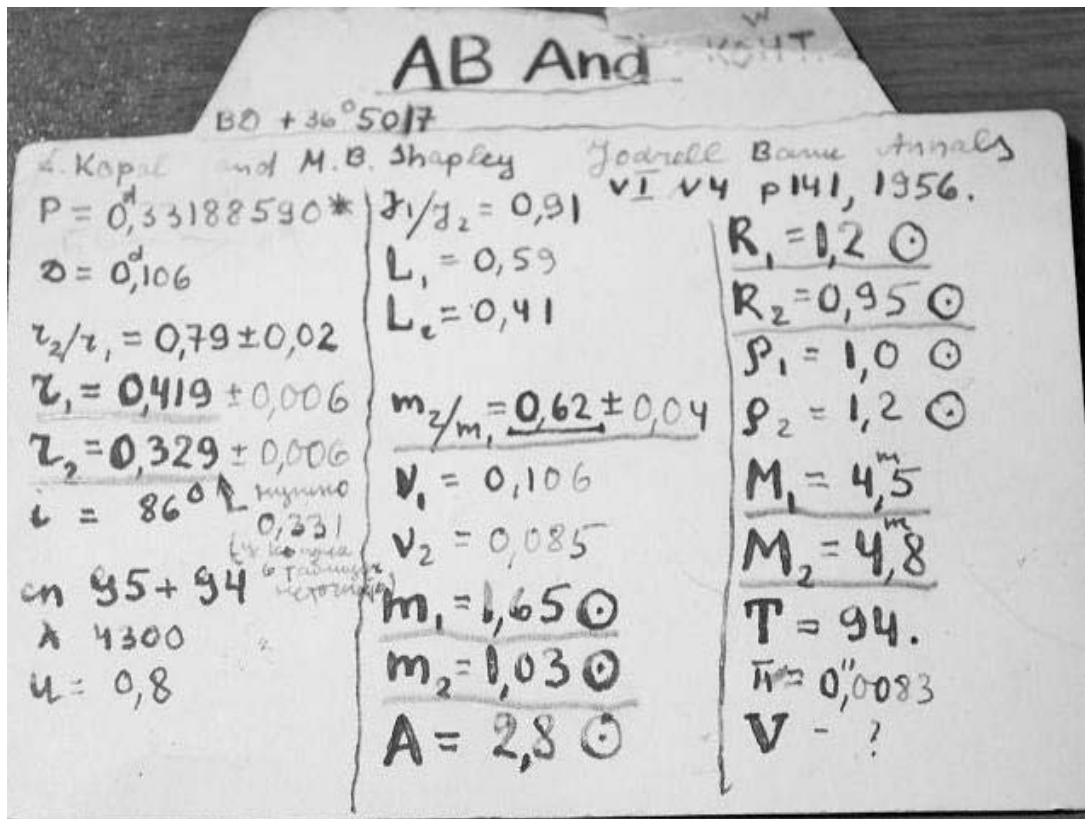


Рис. 1. Пример *KW* системы *AB And* из карточного каталога Свечникова

Самыми информативными из них были те системы, которые имели спектроскопические данные наблюдений, позволяющие непосред-

ственно (по решению кривых лучевых скоростей) или каким-либо косвенным методом оценить отношение масс компонентов q , определить собственно массы компонентов M_1 и M_2 , а также их абсолютные размеры. Более низкий приоритет имели те затменные переменные, для которых элементы спектроскопической орбиты были неизвестны, но имеющиеся сведения о фотометрических элементах орбиты давали возможность оценки отношения масс q и массы одной (обычно наиболее массивной) компоненты системы, M_1 .

К 1969 г. затменных переменных с известными абсолютными и относительными элементами орбиты в карточном каталоге стало 197. Именно они послужили базой для систематизации затменных переменных по общности их геометрических и физических свойств. Динамику изменения геометрических свойств компонент отражает *степень наполнения внутренних критических поверхностей* (ВКП), или полостей Роша. С некоторого момента звезды начинают активно взаимодействовать между собой, обмениваться массой. Вот почему геометрический критерий Копала был сохранен и в новой классификации. Но заполнение полостей Роша веществом компонентов может случаться не однажды за время эволюции звезд, важно выделить текущий статус системы. Это позволяет сделать диаграмма Герцшпрунга—Рессела (Г—Р). *Локализация компонентов ТДС на диаграмме Г—Р* рассматривается в качестве второго критерия новой классификационной схемы, который помогает установить эволюционный статус компонент ТДС. В результате новая классификация ТДС оказалась удобной и компактной и позволила разбить 197 ТДС карточного каталога на девять однородных по геометрическим и физическим свойствам классов, исходя из общности комбинаций двух приведенных выше критериев классификационной схемы. В названиях классов использовались уже сложившиеся терминологические понятия, например, «системы с разделенными компонентами», «полуразделенные», «контактные ранних спектральных классов» ...

Результаты выполненной классификации были опубликованы в Каталоге орбитальных элементов, масс и светимостей ТДС Свечникова (1969) [8], содержащем сведения о 197 ТДС, включая признак принадлежности к классу (см. таблицу).

Для статистических исследований нужны большие по объему каталоги, как правило, в таких каталогах собраны самые общие сведения о затменно-переменных звездах. Например, в третьем издании ОКПЗ III [9] и трех дополнениях к нему [10] для затменных

Классификационная схема ТДС Свечникова

Краткое название класса	Полное название класса	Определение класса
РГП	Разделенные Главной Последовательности	Оба компонента находятся на ГП и не заполняют свои ВКП. Более массив- ный компонент — звезда
ПР	Полуразделенные	Более массивный компонент — звезда ГП и не заполняет ВКП, спутник — субгигант, близкий по размерам ВКП
РС	Разделенные с субгиган- том	Более массивный компонент — звез- да ГП и не заполняет ВКП, спут- ник — субгигант, по размерам далекий от ВКП
С—Г	Сверхгигант—гигант	Системы, в которых хотя бы один из компонентов является поздним гигант- том или сверхгигантом
С—К	Субкарлик—карлик	Системы, в которых хотя бы один из компонентов находится в далекопро- двинутой эволюционной стадии, явля- ясь горячим субкарликом или белым карликом или компактным некласси- ческим объектом: NS, BH. Здесь же звезды типа Вольфа—Райе
~KW	Подобные KW, или предконтактные, или короткопериодиче- ские RS CVn	Компоненты далеки от заполнения ВКП, хотя их периоды намного коро- че, чем у РГП-систем таких же масс. Признаки хромосферной активности
KW	Контактные типа W UMa	Контактные поздних спектральных классов (Sp_1 позднее $F0$), часто по- гружены в общую оболочку. Находят- ся в фазе обмена массой и потери ее из системы. Признаки магнитной и хромосферной активности, на что указывают резонансный дублет MgII 2802 \AA и L_α . Наличие фотометриче- ской волны
KP	Контактные Ранние	Контактные ранних спектральных классов (Sp_1 ранее $F0$)
AR	Типа AR Lac, или типа RS CVn	Оба компонента сошли с ГП, оста- ваясь разделенными. Хромосферно- активные ТДС с корональными вы- бросами вещества подобно солнечным вспышкам, периодичность которых ук- ладывается в модели <i>циклической пя- тенной активности</i>

переменных (их численность — 4 704) приводятся тип кривой блеска (EA , EB , EW), орбитальный период P и глубина главного затмения A_1 ; не всегда приводится разность глубин минимумов ΔA и редко — спектральный класс главного компонента Sp_1 . Естественно возникал вопрос: можно ли, опираясь на эти простые критерии, являющиеся первичными данными наблюдений, построить классификацию, которая бы различала ТДС по эволюционному статусу, как это было выведено из анализа абсолютных элементов? Ответом на этот вопрос и стала идея поиска новых простейших, следуемых из прямых наблюдений, критериев классификации.

И снова здесь помог карточный каталог Мария Анатольевича, в котором для 367 из 474 ТДС имелись информация об их фотометрических элементах, данные о спектрах компонент и об отношении масс. Из этих данных, используя методы приближенных оценок, можно было вывести абсолютные элементы орбиты и астрофизические параметры звезд (массы, радиусы). Последующий их анализ с помощью теоретических модельных треков позволил уверенно их отклассифицировать. Получился следующий расклад по численностям: $РГП$ — 77; PP — 143; PC — 21; KW — 47; KP — 48; $C-G$ — 20; AR — 6; KW — 5.

Простые критерии классификации: A_1 — ΔA

Поскольку классификация этих систем уже выполнена, можно было изучать распределения числа систем каждого класса по простым параметрам, образующим 4-мерное пространство формальных переменных — P , A_1 , ΔA и Sp_1 . Предположим, что все данные, которые мы имеем для 367 ТДС карточного каталога, это именно P , A_1 , ΔA и Sp_1 . Тогда методом кластерного анализа осуществлялся перебор проекций функции распределения числа ТДС данного класса на плоскости формального пространства. Этот метод позволил вывести жесткие критерии разделения ТДС по классам, которые удобно представить в виде классификационных шкалок.

Оказалось, что PP и PC системы в подавляющем большинстве имеют $A_1 > 0.8^m$. Это связано с тем обстоятельством, что спутники в этих системах являются субгигантами низкой светимости и очень больших размеров, которые в момент затмения полностью закрывают главный компонент — звезду ГП. Только в тех случаях когда наклонение орбиты i к картинной плоскости будет заметно меньше 90° , тогда A_1 будет мало. Также следует отметить $РГП$ системы, компо-

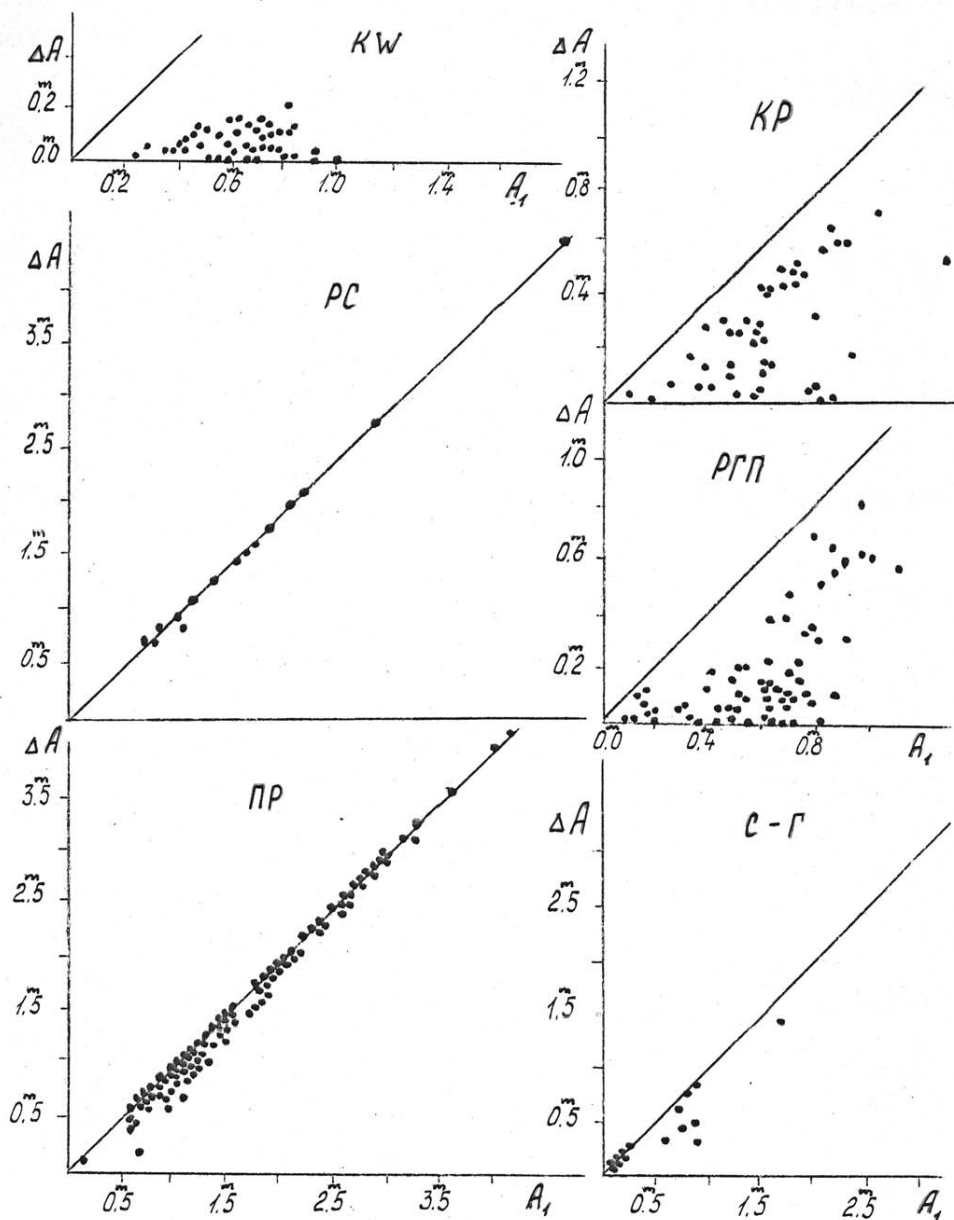


Рис. 2. Классификационная диаграмма $\Delta A-A_1$

ненты которых сильно отличаются по поверхностной яркости, вследствие чего затмение в главном минимуме будет неглубокое. Анализ ошибок и «примесей» в предварительной классификации осуществляется надежнее, если подключить критерий ΔA . Для 92.6 % систем типа *ПР* и *РС* $\Delta A > 0.6^m$, в то время как у *РГП* и *КР* систем $\Delta A < 0.6^m$, а у 98 % *KW* систем — $\Delta A < 0.3^m$. Но даже для тех *ПР*- и *РС*-систем, у которых $\Delta A < 0.6^m$, сегрегация их от фона других классов происходит гораздо уверенней, если использовать сдвоен-

ный критерий $A_1 - \Delta A$ (рис. 2). Для PP - и PC -систем значения A_1 и ΔA близки и, как видно из рис. 2, попадают в зону, примыкающую к биссектрисе, тогда как остальные системы показывают заметные отклонения от нее: $\Delta A \ll A_1$.

Простые критерии классификации: $P - Sp_1$

Изучение распределений ТДС по орбитальным периодам показало, что PP - и PC -системы легко отделяются друг от друга по критерию $P = 8^d$: для PP -систем периоды короче 8^d , а у 90 % PC -систем длиннее 8^d . Категоричность этого критерия проявилась и в других классах:

- KW системы: $P < 0.5^d$;
- KP системы: $0.5^d \leq P \leq 1.58^d$;
- $РГП$ системы: $1.58^d < P \leq 20^d$;
- $C - \Gamma$ системы: 95 % систем этого класса имеют $P > 20^d$; 70 % систем этого класса имеют $P > 100^d$, в сочетании с малыми A_1 и ΔA этот критерий легко отделяет $C - \Gamma$ -системы от PC -систем).

Оставшаяся неопределенность в классификации систем устраняется, когда задействуется критерий, полученный при изучении распределений ТДС по спектру главного компонента. Более того, этот критерий позволяет выявить дополнительные классы, которые не могли быть замечены в проекциях распределений по A_1 , ΔA и P . Речь идет о классах $\sim KW$, AR и $C - K$.

Класс предконтактных систем $\sim KW$ «замывается» на фоне контактных систем типа KP и KW . Распределение этих систем по спектральному классу главного компонента показывает, что $Sp_1 \sim KW$ систем позднее $F0$, тогда как у KP систем Sp_1 ранее $F0$. Разделение KW и $\sim KW$ классов выполняется по орбитальному периоду, который у $\sim KW$ систем превышает предел 0.5^d .

Системы AR класса имеют спектральный класс $F - K$ для обоих компонентов, которые являются субгигантами $IV - V$ класса светимости. У $C - \Gamma$ систем класс светимости $I - II$ или поздний III , и эта подробность важна для тех 5 % $C - \Gamma$ систем, у которых, как и у $РГП$ систем, период короче 20^d . Напомним, что у $РГП$ систем класс светимости — V . PP и PC системы в подавляющем своем большинстве имеют Sp_1 более ранний, чем $G0$.

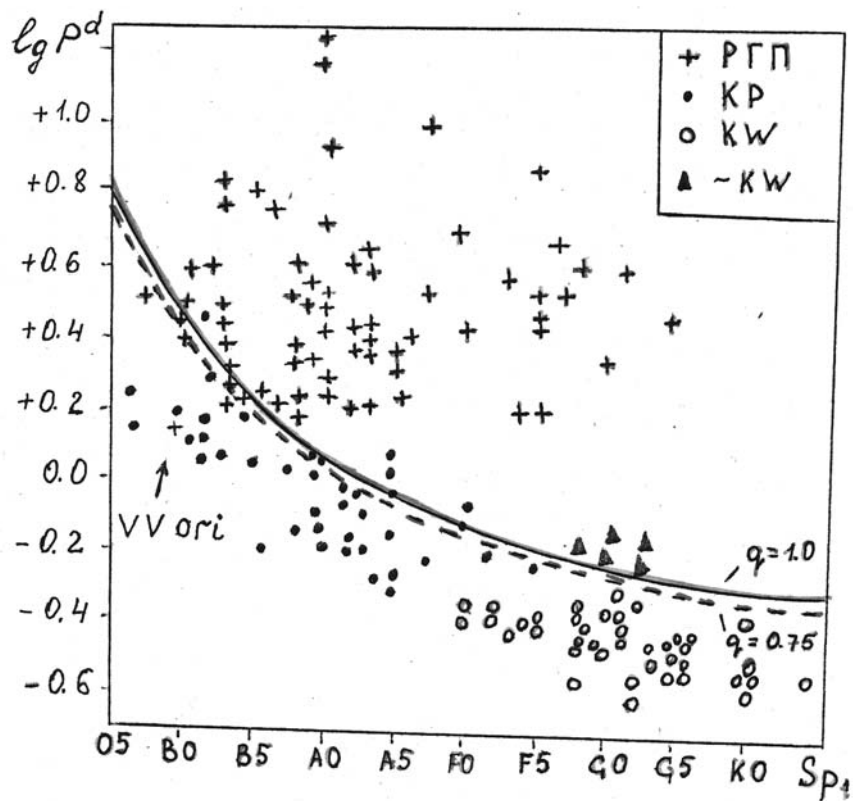


Рис. 3. Классификационная диаграмма $Sp-P$

Для более уверенного отделения KP систем от короткопериодических PGP систем вновь оказалось эффективным использование сдвоенного критерия « $P-Sp_1$ » (рис. 3). Здесь нашло отражение то обстоятельство, что у KP систем при любом отношении масс компонент q их радиусы близки к размерам своих полостей Роша, тогда как PGP системы, имея $q \approx 1$, редко заполняют свои полости Роша более чем на 70 %.

Риснок 3 иллюстрирует способ разделения систем рассматриваемых классов, границы которых четко отделяются положением сплошной и пунктирной линий, отражающих зависимость $Sp_1(P)$ для PGP систем с $q = 1$ и $q = 0.75$ соответственно, при том, что главная компонента в обоих случаях заполняет свою полость Роша на 3/4. Эта же диаграмма позволяет отделять $\sim KW$ от KP систем, которые проецируются на один и тот же интервал изменения орбитальных периодов.

Апробация классификационной схемы на ОКПЗ III

Таким образом, были составлены классификационные шкалки, анализирующие значения четырех параметров A_1 , ΔA , P и Sp_1 и разделяющие ТДС на классы (рис. 4). Оценка надежности произведенной классификации ТДС проводилась следующим образом: из ОКПЗ III для 367 ТДС карточного каталога Свечникова были использованы лишь данные о A_1 , ΔA , P и Sp_1 и апробированы на только что построенных классификационных шкалках тремя независимыми «испытателями»: Л. Ф. Истоминым, О. А. Греховой, М. А. Свечниковым [7]. Затем результаты этой классификации, проведенной по простым наблюдательным критериям, были сравнены с результатами физической классификации, построенной на анализе астрофизических параметров, выведенных из решения фотометрической и спектроскопической орбит и локализации ТДС на диаграмме Герцшпрунга—Рессела. Для 89.6 % (это 326 из 367 ТДС) выполненная классификация по A_1 , ΔA , P и Sp_1 оказалась правильной.

Процент «примесей» и «потерь» определяется полнотой сведений о простых критериях. Отсутствие информации о Sp_1 может приводить к ошибочной классификации предконтактных ($\sim KW$) систем, которые идентифицируются как KP системы, аналогично не распознаются некоторые короткопериодические с $P < 1.58^d$ РГП-системы, что также вносит «примесь» в KP -класс. Учитывая, что лишь для 345 из 367 ТДС была доступна информация о Sp_1 , именно для этих 345 ТДС была повторена классификация по A_1 , ΔA , P и Sp_1 независимо тремя лицами. Результаты подтверждают необходимость знания четвертого параметра классификации, Sp_1 : доля правильно отклассифицированных систем возросла до 96 %, уверенно выполняется классификация AR и $\sim KW$ систем.

На основании этих результатов был сделан вывод о практической применимости найденных простых критериев для массовой приближенной классификации затменно-переменных звезд, которая представляет большой интерес при статистических исследованиях ТДС и изучении их эволюции. Этот вывод немедленно был проверен на данных каталога ОКПЗ III, содержащего 4 704 затменно-переменных систем (обозначенных как E -«eclipse»). Для многих из этих ТДС не приводятся данные о разности глубин минимумов ΔA , для 581 ТДС нет сведений об орбитальном периоде (такие системы сразу же исключались из классификационной выборки). Спектры главных компонентов были известны только для 1 285 ТДС, для которых можно

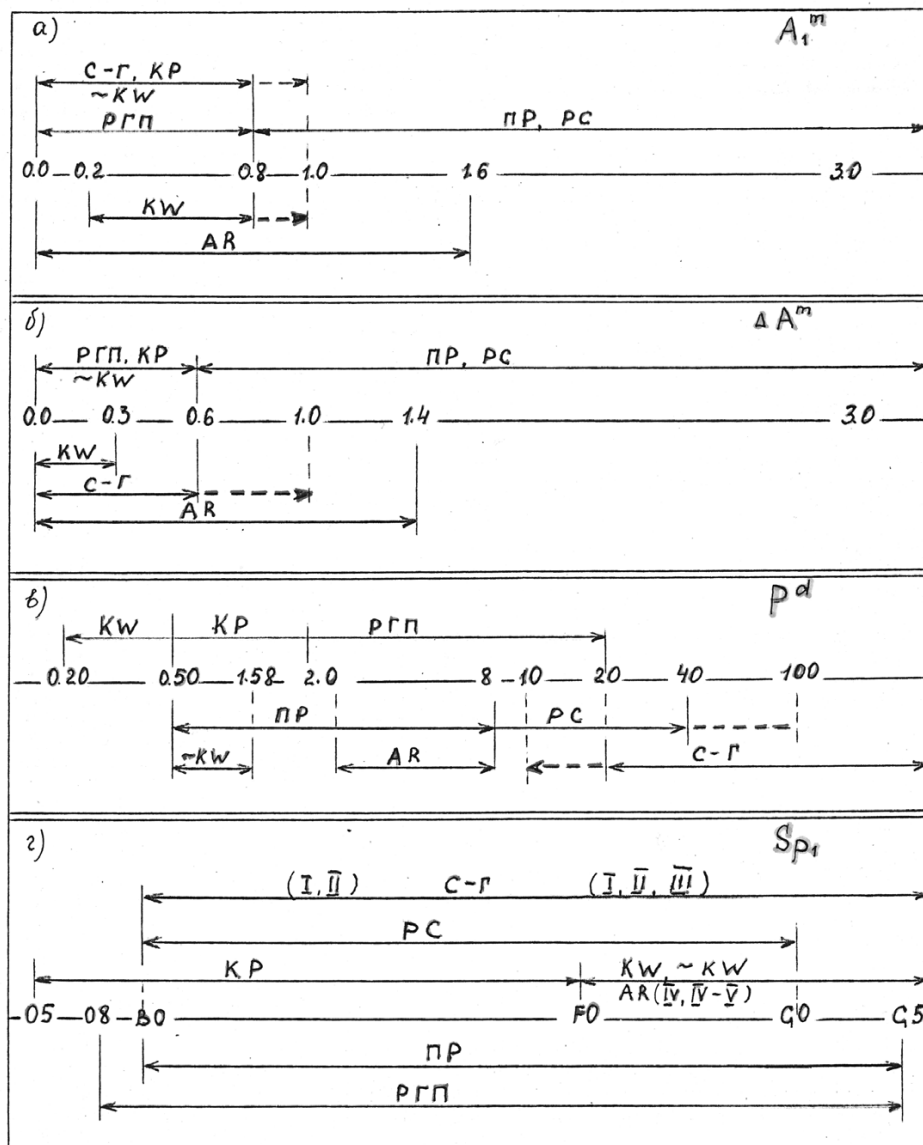


Рис. 4. Шкалки простых критериев классификации

было провести уверенную классификацию по всем четырем параметрам. Для большинства же систем спектры в ОКПЗ III не даны, поэтому для них выполнялась трех- и даже двухпараметрическая классификация. Следуя символике, принятой в ОКПЗ III для обозначения степени надежности данных, результаты классификации таковы:

- 58 % — доля уверенно классифицированных систем (!);
- 17 % — доля систем, отклассифицированных с незначительной степенью уверенности (:);
- 13 % — доля систем, класс которых установлен с довольно зна-

чительной степенью неуверенности (?);

- 12 % — доля систем, класс которых не установлен ($E?$).

Перспективы новых классификаций

Итак, итогом проверки разработанных М. А. Свечниковым и его коллегами [7] простых критериев классификации ТДС стало их применение для всех затменных переменных из ОКПЗ III и дополнений к нему, для которых были известны A_1 , ΔA , P , Sp_1 , а также публикация результатов классификации в следующем издании ОКПЗ IV, вышедшем в свет в 1985 г. под редакцией Холопова [11]. И сегодня, спустя четверть века, когда ОКПЗ [12] переведен на новый уровень точности координат переменных звезд, он по-прежнему стоит в одном ряду с такими каталогами, как *Hipparcos*, *WDS*, полнота которых ($\sim 10^5$ систем) находится на пределе возможности сопровождения данных человеком. Следующее поколение каталогов, концепцию которых во многом еще предстоит сформулировать в ожидании окончания миссий *Integral*, *COROT*, *Kepler*, *GAIA*, *SIM* и др., будет лишено «человеческого лица».

Сегодня продолжается работа по поиску новых классификаций переменных звезд, включая классификации ТДС. Ведь классификационная схема Свечникова была разработана для ТДС, находящихся в первой фазе обмена массой, которой, естественно, не заканчивается эволюция этих объектов. Широкий спектр современных наблюдательных данных позволяет различать нюансы в переходных эволюционных стадиях вырожденных звездных объектов, сопровождающихся образованием кольцевых туманностей, аккреционных дисков и колец, джетов. Предшествующие этим структурам вспышки и взрывные процессы хорошо разделяются в энергетическом диапазоне, что можно рассматривать в качестве критерия классификации поздних стадий эволюции ТДС. Гарантацией правильно выполненной классификации является сохранение ее структуры на большей по масштабу статистике. Вновь же обнаруженные классы встраиваются в базовую классификацию по типу иерархической вложенности. Нет сомнения, что схема Свечникова органически встроится в новую классификацию, какие бы сюрпризы ни преподнесли наблюдения перспективных космических миссий и гигантских наземных телескопов.

Библиографические ссылки

1. *Кукаркин Б. В., Паренаго П. П.* Общий каталог переменных звезд. — М. : Изд-во АН СССР, 1948.
2. *Payne-Gaposchkin C., Gaposchkin S.* Variable stars // Harvard Observatory Monographs. — 1938. — Vol. 5.
3. *Крат В. А.* Классификация тесных двойных звезд // Астрон. журн. — 1944. — Vol. 21. — P. 20—26.
4. *Plaut L.* An Investigation of the Eclipsing Binaries Brighter than Photographic Magnitude 8.50 at Maximum // Publications of the Kapteyn Astronomical Laboratory Groningen. — 1953. — Vol. 55. — P. 1—62.
5. *Kopal Z.* The classification of close binary systems // Annales d'Astrophysique. — 1955. — Vol. 18. — P. 379.
6. *Sahade J.* Close binary systems // Stellar Atmospheres / ed. by J. Greenstein. — Chicago, 1960.
7. *Свечников М. А., Истомин Л. Ф., Грехова О. В.* Разработка и применение простых критериев для массовой классификации затменно переменных звезд // Переменные звезды. — 1980. — Т. 21, вып. 3. — С. 399.
8. *Свечников М. А.* Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд // Учен. зап. УрГУ. — Свердловск : УрГУ, 1969. — Астрономия. № 88. — С. 179.
9. *Кукаркин Б. В., Холопов П. Н., и др.* Общий каталог переменных звезд. — 3-е изд. — М. : Изд-во АН СССР, 1969, 1970. — Т. 1, 2.
10. *Кукаркин Б. В., Холопов П. Н., и др.* Дополнения к третьему изданию ОКПЗ. — М. : Изд-во АН СССР, 1971, 1974, 1976. — Т. 1—3.
11. *Холопов Б. В., Самусь Н. Н., и др.* Общий каталог переменных звезд. — 4-е изд. — М. : Изд-во АН СССР, 1985, 1987, 1990. — Т. 1—4.
12. *Самусь Н. Н., и др.* Общий каталог переменных звезд. — Strasbourg: CDS, yCat:102025. — 2009.

БАЗА ДАННЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД BDB: СОВРЕМЕННЫЕ И БУДУЩИЕ КАТАЛОГИ

Представлено описание разрабатываемой в Институте астрономии РАН Базы данных двойных звезд (Binary star DataBase, BDB). BDB включает информацию о физических и астрометрических параметрах двойных звезд различных типов: визуальных, спектроскопических, затменных и др. Рассматриваются основные проблемы, связанные с агрегацией в единой базе данных информации о различных типах двойных, полученной из разнородных источников данных астрономических каталогов и обзоров. Описаны структура разрабатываемой базы данных, методика преобразования данных из форматов различных каталогов в формат BDB, а также основные методы кросс-идентификации объектов, упоминающихся в более чем одном источнике. Обсуждается включение в BDB данных о двойных звездах, которые будут получены планируемой космической миссией Gaia.

Description of the Binary star DataBase (BDB) is presented here. BDB is developed in the Institute of Astronomy RAS, and contains information on physical and positional parameters of binary stars, belonging to various observational types: visual, spectroscopic, eclipsing, etc. Problems of information on various type binaries (obtained from heterogeneous sources of data — astronomical catalogues and surveys) aggregation in a unique database are considered in the paper. Database structure, principles of data transformation from original catalogs' formats into the BDB format, as well as basic cross-identification methods for multi-source objects are also described here. Binary star data from the planning space mission Gaia are also discussed.

Двойные звезды

Двойные звезды весьма многочисленны: более половины (по некоторым оценкам — более 90 %) звезд образуются в двойных и

кратных системах. Кроме того, двойные звезды чрезвычайно важны для определения фундаментальных (определяющих эволюционный сценарий) характеристик звезд: масс, радиусов и температур. В частности, масса звезды (параметр, практически в одиночку определяющий всю звездную эволюцию) принципиально не может быть определена из наблюдений одиночных звезд (единственное исключение — Солнце). Таким образом, двойные звезды — единственный источник данных для получения фундаментальных соотношений между звездными параметрами (соотношения «масса—светимость», «масса—радиус» и т. п.). Эти соотношения необходимы в астрономии для оценки параметров звезд, а также являются ключом к решению вопроса об образовании двойных и одиночных звезд (так называемая история звездообразования — распределение по разным параметрам звезд, образующихся в данной звездной системе). Таким образом, исследование двойных звезд — одна из наиболее актуальных задач современной астрофизики.

Двойственность звезд проявляется по-разному и может быть обнаружена, например, из визуальных позиционных наблюдений (компоненты наблюдаются как две отдельные звезды), из фотометрических наблюдений (компоненты пары сливаются в один объект, блеск которого периодически меняется из-за орбитального движения, приводящего к затмениям в системе), из спектроскопических наблюдений (орбитальное движение компонентов проявляется из эффекта Доплера — периодического смещения линий в спектре звезды), из рентгеновских наблюдений (регистрируется излучение от нагретого до сверхвысоких температур вещества, перетекающего с одного компонента на другой) и пр.

Комплексное исследование двойных звезд затруднено тем, что эти разные ансамбли двойных звезд:

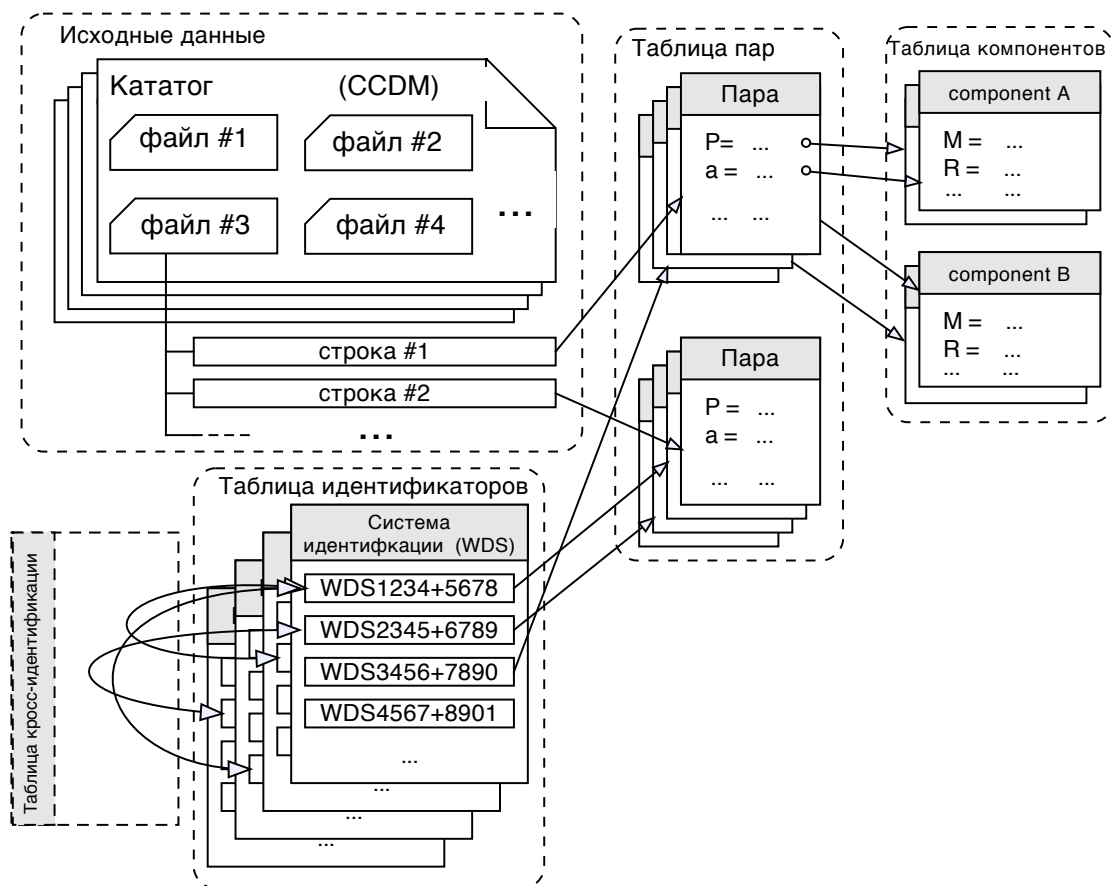
- исследуются, как правило, разными научными коллективами (таким образом, публикуемые базы данных и каталоги содержат сведения лишь о двойных определенного типа);
- зачастую представляют весьма различные семейства и в пространстве параметров (так, почти все визуальные двойные — слабые маломассивные пары, а почти все спектроскопические двойные, наоборот, яркие массивные пары).

Как следствие, результаты исследований различных типов двойных звезд перекрываются весьма слабо. В результате до сих пор остается открытым такой фундаментальный вопрос, как уникальность истории звездообразования, а именно: должны ли мы считать, что образование широких и тесных двойных подчиняется разным законам, при том, что существуют наблюдательные и теоретические аргументы как «за», так и «против»? Далее, получаемые для разных типов двойных калибровочные зависимости между фундаментальными параметрами звезд «сшиваются» между собой зачастую весьма неуверенно.

Для проверки астрофизических гипотез, касающихся двойных звезд, необходимо получение репрезентативных выборок объектов, параметры которых удовлетворяют некоторым критериям, зачастую довольно сложным. Например, для верификации модели аккреционных дисков звезд типа SU UMa может потребоваться выборка из звезд, находящихся на стадии полуразделенной звезды с компактным компонентом (т. е. только звезды определенного эволюционного статуса), имеющих массу главного компонента порядка массы Солнца, с орбитальным периодом не более 3 ч, демонстрирующих наличие супервспышек и имеющих наклон экваториальной плоскости к лучу зрения не более 30° . Кроме того, поскольку выборка может делаться для составления программы наблюдений, необходимо, чтобы все эти звезды были доступны для наблюдения из определенной точки в заданный период времени и их звездные величины не выходили за пределы чувствительности используемых приборов. Имеющиеся на данный момент инструменты не позволяют проводить такие выборки автоматически, что приводит к необходимости создания специального инструментария для работы с астрономическими данными, касающимися двойных звезд.

База данных двойных звезд

Разрабатываемая в настоящий момент в Институте астрономии РАН База данных двойных звезд (Binary star DataBase, BDB) будет содержать данные о порядка 100 000 звездных систем с кратностью от 2 до 22. Данные, содержащиеся в BDB, планируется получить путем объединения множества каталогов, содержащих информацию о двойных и кратных звездах разных типов: визуальных двойных, спектральных, астрометрических, интерферометрических, спектроскопических, фотометрических и т. д. Из этих каталогов планиру-



Структура базы данных BDB

ется извлечь как наблюдательные данные о координатах, собственных движениях, периодах, переменности, звездных величинах, а также астрофизические параметры — эволюционный статус, отношение масс и т. п. Данные из базы могут быть получены по запросам, включающим один или несколько индексируемых параметров, либо по идентификатору, принадлежащему какой-либо из поддерживаемых систем идентификации.

BDB разрабатывалась изначально в обсерватории Безансона (Франция), в 2008 г. ее разработка была перенесена в Москву. Одновременно с переносом структура и интерфейс базы данных были существенно переработаны. Основные цели и идеи, лежащие в основе разработки BDB, изложены в [1–3]. Структура базы данных BDB схематично показана на рисунке. Объект, хранящийся в базе данных, может принадлежать к одному из следующих классов: Системы, Пары и Компоненты, образующих иерархию за счет связей. Системы являются наиболее высокоуровневыми объектами иерархии, каждая система ссылается на одну или несколько входящих в нее Пар. Па-

ра представляет собой ровно два гравитационно связанных объекта, каждый из которых может быть Парой (более тесной) или Компонентом. Пара ссылается, как правило, на один или два компонента в зависимости от имеющихся данных (в каталогах в некоторых случаях может отсутствовать информация об одном из компонентов Пары). Компонент соответствует отдельной звезде, входящей в Пару.

Каждый объект, хранящийся в базе данных, содержит информацию о соответствующей ему сущности. Так, Пара может содержать информацию о размере большой полуоси, периоде, типе пары (визуальная двойная, спектроскопическая, фотометрическая и др.), а также прочие параметры, относящиеся к двойной звезде как к целому. Компонент же содержит информацию о массе, эволюционном статусе, светимости и т. п. данные, относящиеся к отдельной звезде. Кроме того, каждый объект может иметь один или несколько идентификаторов в разных системах идентификации, соответственно каждый объект ссылается на одну или несколько записей в таблице идентификаторов.

Информация, содержащаяся в BDB, скомпилирована из множества различных каталогов, содержащих разные данные. Часть этих данных может пересекаться, при этом информация из одного каталога может противоречить информации из другого. Прежде всего это связано с различием в точности и методике измерений, однако также может быть следствием ошибок, содержащихся в исходных каталогах. Выбор между несколькими значениями одного и того же параметра, предлагаемыми различными каталогами, часто не может быть сделан автоматически, поскольку причина расхождения часто вызвана природой самого объекта. Например, светимость переменных звезд может варьироваться в пределах нескольких звездных величин как периодическим, так и аperiodическим образом, соответственно измерения, проведенные в разное время, могут давать существенно различный результат. Соответственно, чтобы избежать потери важных данных, в базе данных BDB хранятся одновременно все версии данных, относящихся к одной и той же сущности (системе, паре или компоненту). При этом число хранимых объектов, соответствующих, например, некой паре, будет равно числу каталогов, в которых эта пара упоминается.

Для связи между различными версиями одного объекта используются идентификаторы, а также кросс-идентификационная таблица, также входящая в состав BDB. Например, два объекта, ссылающихся на один и тот же идентификатор, всегда являются версиями одного и того же объекта. Кроме того, поскольку каждый объект может ссылаться на несколько идентификаторов, возможна кросс-идентификация между объектами, не ссылающимися непосредственно на один и тот же идентификатор. Действительно, если объект А ссылается на идентификаторы id1 и id2, объект В — на id2 и id3, а объект С — на id3, то все они являются версиями одного объекта. Кросс-идентификационная таблица используется в случае, когда информация о соответствии идентификаторов друг другу получена не из каталогов, а из каких-либо внешних источников, не входящих в BDB.

Многовариантность астрономических данных может приводить к ситуациям, когда один и тот же объект в различных источниках относится к различным классам. Так, например, компонент пары, присутствующей в одном из источников, может сам фигурировать как пара в других источниках. Это связано с тем, что при повышении точности наблюдений часть объектов, считавшихся ранее точечными, разделяются на компоненты и входят в каталоги уже как пары. Одним из принципов построения BDB является сохранение максимально большого количества информации о двойных звездах, что приводит к необходимости хранения противоречивых данных. В случае кросс-идентификации объектов, относящихся к различным классам (например, Компонента и Пары), будут сохранены обе версии объекта, а наличие таблиц кросс-идентификации позволяет отображать всю найденную информацию об объекте по запросу пользователя.

Соответственно при поиске по заданным пользователем критериям будут найдены все объекты, параметры хотя бы одной из версий которых удовлетворяют заданному критерию. Однако, поскольку все версии одного и того же объекта связаны, в поисковой выдаче будут показаны все версии найденных объектов, а не только те, что удовлетворяют критериям поиска. Это позволяет исследователю получить более полный объем информации и уже самостоятельно провести отбор необходимых данных в соответствии с собственными потребностями.

Реализация BDB

Создаваемая база данных реализована на основе свободно распространяемой СУБД PostgreSQL, доступ к которой осуществляется через web-интерфейс, написанный на языке Python с использованием свободно распространяемого фреймворка Nagare ([http : //www.nagare.org](http://www.nagare.org)). Фреймворк Nagare основан на использовании продолжений (continuations), что позволяет создавать web-приложения, не заботясь о сохранении состояния программы (содержимого переменных и полей объектов) между перезагрузками страницы. Это существенно облегчает и ускоряет разработку, а также упрощает отладку сложных web-приложений. Интегрированная в Nagare система ORM (object-relational mapping) Elixir ([http : //elixir.ematia.de/](http://elixir.ematia.de/)), основанная на SQLAlchemy ([http : //www.sqlalchemy.org/](http://www.sqlalchemy.org/)), позволяет работать с записями в базе данных как с объектами. Это упрощает доступ к данным и позволяет абстрагироваться от конкретной реализации SQL. Кроме того, фреймворк Nagare позволяет прозрачно интегрировать в веб-страницы элементы, построенные на технологии Ajax, что дает возможность обновлять часть информации на странице без ее полной перезагрузки, снижая нагрузку на сервер и делая интерфейс более отзывчивым на действия пользователя. Также фреймворк Nagare включает в себя модуль прозрачной трансляции кода, написанного на Python в код Javascript, исполняемый на стороне клиента. При помощи такой трансляции становится возможным вынести, например, проверку корректности вводимых данных в клиентскую часть, исполняемую непосредственно в браузере пользователя.

Источники данных BDB

Наполнение BDB данными представляет собой очень сложную задачу и включает в себя ряд этапов:

1. Подбор источников, содержащих нужную информацию.
2. Построение алгоритмов, преобразующих данные выбранных источников в формат, соответствующий структуре BDB.
3. Преобразование данных и пополнение BDB.
4. Кросс-идентификацию новых данных.
5. Выборочную проверку и тестирование новых данных.

На этапе 1 основной трудностью является выбор необходимых источников информации, поскольку существует множество различных каталогов и обзоров, содержащих информацию о двойных звездах. Как правило, в них применяются различные системы идентификации, кроме того, они имеют разную структуру.

На этапе 2 главной проблемой является то, что данные, необходимые для пополнения BDB, могут не присутствовать в отобранных источниках в явном виде. Например, один и тот же параметр может быть дан в различных единицах измерения в различных каталогах либо для его получения требуется проведение вычислений, подчас довольно нетривиальных. Кроме того, большинство каталогов не было рассчитано на машинную интерпретацию, и часть важных данных может быть дана в них в виде текстовых пояснений. Таким образом, для извлечения нужной информации зачастую необходимо построение сложных эвристических алгоритмов, анализирующих как табличные данные фиксированного формата, так и текстовую информацию.

Этап 3 проводится автоматически, но, учитывая большой объем данных и сложность применяемых алгоритмов, может быть весьма затратным в плане вычислительных ресурсов.

Этап 4 также требует нетривиального подхода, поскольку, несмотря на то, что кросс-идентификация частично проведена авторами используемых каталогов и обзоров, она не всегда свободна от ошибок. Имея доступ к большему количеству источников, можно реализовать нахождение случаев ошибочной кросс-идентификации, однако это требует создания довольно сложных эвристических алгоритмов и специального инструментария для анализа данных. Кроме того, возможно проведение кросс-идентификации объектов по различным критериям, таким, как близость координат, собственных движений, светимостей и т. п., однако такой подход также требует создания весьма сложных алгоритмов. В рамках BDB планируется ввести собственную систему идентификации, покрывающую все известные классы двойных и кратных звезд, а также создать таблицы кросс-идентификации, устанавливающие соответствие между идентификаторами BDB и другими системами идентификации.

На этапе 5 возможна как автоматическая, так и полуавтоматическая верификация данных. Для автоматической проверки требуется разработка критериев «корректности» вычисляемых значений. В случае обнаружения ошибочных данных требуется коррекция алгоритмов, применяемых на этапах 2—4.

Процесс наполнения BDB данными выглядит следующим образом:

1. Загрузка архива с данными и его распаковка. В настоящий момент для удобства отладки реализована возможность автоматического скачивания данных с сервера CDS по CDS-идентификатору каталога.
2. Распознавание содержимого файла ReadMe и определение формата данных, содержащихся в текстовых файлах таблиц. В случае отсутствия или нестандартного формата файла ReadMe возможно задание формата вручную. Пока реализована поддержка импорта данных только из текстовых таблиц.
3. Описание алгоритмов, выделяющих индексируемые данные (такие, как координаты, светимости, собственные движения и пр.) из текстовых файлов. Алгоритмы (в общем случае) представляют собой фрагменты кода на языке Python, которые впоследствии будут скомпилированы и исполнены в процессе распознавания каждой строки. Для ввода кода предусмотрен специальный web-интерфейс, позволяющий автоматизировать наиболее рутинные действия и предоставляющий подсказки, облегчающие написание кода. Также в интерфейсе реализована возможность сохранения промежуточных версий введенного кода, что существенно упрощает отладку и тестирование.
4. Пробное распознавание первых 100 строк таблицы. Этот шаг служит для проверки кода и вывода диагностической информации в случае наличия ошибок.
5. Полное распознавание таблицы, проводится автоматически и может (для больших каталогов) занимать до часа времени. В процессе распознавания web-интерфейс отображает степень завершенности задачи, ожидаемое время окончания и число найденных ошибок. В случае необходимости распознавание может быть прервано. Кроме того, процесс распознавания прерывается автоматически в случае нахождения большого числа ошибок (>1000).
6. Обзор ошибок распознавания (если такие были найдены). В случае необходимости возможен возврат к шагам 2—5.

При наличии в каталоге нескольких таблиц шаги 2—6 повторяются для каждой из них. После распознавания всех таблиц возможны проведение выборочной ручной проверки правильности данных при

помощи web-интерфейса либо автоматическая проверка при помощи скриптов, обращающихся напрямую к СУБД.

Gaia и двойные звезды

Gaia — космический телескоп Европейского космического агентства, который является преемником проекта Hipparcos. Запуск телескопа намечен на август 2013 г. с космодрома Куру во французской Гвиане ракетой-носителем «Союз». Телескоп будет работать в оптическом диапазоне. Он будет помещен во вторую точку Лагранжа (L2) системы Солнце—Земля, которая находится на расстоянии около 1.5 млн км от Земли в противоположном от Солнца направлении. Основная задача телескопа — составить подробную трехмерную карту распределения около миллиарда звезд Галактики: с координатами, собственными движениями, лучевыми скоростями и фотометрией. Помимо этого Gaia обнаружит около 10 000 экзопланет, а также астероиды и кометы в Солнечной системе.

Телескоп также будет открывать двойные звезды. Gaia не сможет разрешить двойные с расстоянием между компонентами ρ ниже ~ 20 mas, которые сегодня обычно разрешаются с земли методом спекл-интерферометрии. При таком угловом расстоянии смогут быть измерены только системы с почти равными по блеску компонентами, но при ρ в несколько угловых секунд Gaia сможет обнаружить даже очень слабые вторичные компоненты. Для выборки, ограниченной по расстоянию, эффективность обнаружения двойных будет, таким образом, низкой для периодов, соответствующих ρ в области 20—50 mas, но она значительно увеличится для более широких систем.

Высокоточные параллаксы и собственные движения позволят также обнаруживать самые широкие двойные и изучать их связь с парами с общим собственным движением и ассоциациями.

Gaia чрезвычайно чувствительна к нелинейным собственным движениям. Большая часть всех астрометрических двойных с периодами от 0.03 до 30 лет будет немедленно обнаружена по низкому уровню согласия их движения со стандартной моделью движения одиночной звезды. Большинство двойных с очень отличающимися массами/блесками останутся неразрешенными, но во многих случаях можно будет определить фотоцентрическую орбиту. Эффективность обнаружения, в зависимости от периода, покажет пик, содержащий астрометрические двойные, и пик, содержащий разрешенные

двойные. Пробел между ними будет находиться в районе $\log P(y) = 2.5$.

Результаты моделирования показывают, что Gaia обнаружит большинство (59 %) из примерно 10 миллионов двойных, расположенных ближе, чем 250 пк от Солнца. Для расстояний до 1000 пк эта доля снижается до 35 %.

Обнаруженные двойные будут каталогизированы. Данные также будут включены в BDB.

Заключение

В работе описаны цели, процесс создания и содержание Базы данных двойных звезд (Binary star DataBase, BDB). В процессе разработки BDB были решены следующие задачи:

1. Создан список оригинальных каталогов и баз данных, содержащих эмпирические данные для двойных и кратных звезд различных типов.
2. Проведена большая работа по созданию, уточнению и доработке схем классификации двойных звезд различных типов как по наблюдательным проявлениям, так и по эволюционному статусу. Разработана методика сквозной системы идентификации BDB, пригодная для идентификации двойных и кратных звезд всех известных типов.
3. Проведен анализ задач, для решения которых необходимо построение базы данных двойных и кратных звезд. На основе проведенного анализа разработана схема базы данных.
4. Разработан web-интерфейс для импорта данных в BDB, проведен тестовый импорт нескольких каталогов двойных звезд.
5. Разработан прототип пользовательского web-интерфейса для поиска данных в BDB.

База данных двойных звезд будет являться мощным инструментом для исследования этого типа астрономических объектов, так как основная цель ее создания — интеграция и обеспечение доступа к данным обо всех типах двойных звезд. Каталоги двойных звезд раз-

личных типов будут включены в BDB, с базами данных (как специализированными, так и общего назначения) будут установлены связи. Тестирование бета-версии BDB намечено на 2013 г.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-02-00426, 10-07-00342, 11-02-00076, 12-02-00047, 12-07-00528, при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (грант 02.740.11.0247), программы Президиума РАН «Поддержка ведущих научных школ» (грант НШ-3602.2012.2), а также в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.

Библиографические ссылки

1. *Malkov O., Oblak E., Debray B.* The Binary Star Database BDB // ADASS XVIII Conference : eds. David Bohlender, Daniel Durand, Patrick Dowler, Québec : ASP Conf. Ser., 2009. — P. 442—445.
2. *Kaygorodov P., Debray B., Kolesnikov N. et al.* The new version of Binary star database (BDB) // Baltic Astronomy. — 2012. — Vol. 21. — P. 309—318.
3. *Малков О. Ю., Кайгородов П. В., Облак Э., Дебрэ Б.* БДБ: база данных о двойных звездах // Динамика сложных систем. — 2010. — Vol. 4. — P. 48—49.

ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ В ЭПОХУ АСТРОНОМИИ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ ДАННЫХ

Новые средства наблюдений приводят к беспрецедентному потоку открытий переменных звезд. По-видимому, составление каталогов переменных звезд в традиционной форме и традиционными методами в ближайшее время окажется невозможным. В лекции рассказывается о перспективах исследований переменных звезд и их каталогизации.

New techniques of observations result in an unprecedented flow of variable-star discoveries. It appears that, in the near future, it will become impossible to compile variable-star catalogs in the traditional format using traditional techniques. The lecture describes the prospects of studies of variable stars and compilation of their catalogs.

Введение

Работы по каталогизации переменных звезд ведутся в нашей стране по поручению Международного астрономического союза с 1940-х гг. Об их истории подробно рассказано в статье одного из авторов [1]. В настоящее время обозначения в системе Общего каталога переменных звезд имеют свыше 45 000 переменных звезд нашей Галактики. Около 20 000 звезд каталогизированы как заподозренные в переменности (неуверенные открытия или недостаточно исследованные объекты). Довольно строгие правила отбора объектов для ОКПЗ (подразумевающие наличие точных координат, звездный анализ информации авторами каталога и степень изученности, позволяющую проводить классификацию) делают автоматическое слияние ОКПЗ с большими каталогами переменных звезд из обзоров неба невозможным. Наиболее полные списки переменных звезд (например, Международный регистр переменных звезд — VSX,

www.aasvo.org/vsx) сейчас содержат чуть больше 200 000 записей, однако случается, что из-за плохих координат две или более записей относятся к одной и той же звезде.

Принципиальные проблемы для развития каталогов переменных звезд возникают из-за отсутствия каких-либо ограничений на минимальную амплитуду изменений блеска переменной звезды. Таким образом, переменной звездой приходится считать любую звезду, у которой при современном уровне точности фотометрии удастся обнаружить и изучить хотя бы самые небольшие изменения блеска в видимом, ультрафиолетовом или инфракрасном диапазоне спектра. Сегодня в ОКПЗ самая маленькая полная амплитуда переменности (0.004^m) — у Альтаира (α Aql), в то время как, например, у V1500 Cyg наблюдались изменения блеска более чем на 19 звездных величин.

Наиболее полные звездные каталоги (например, каталог B1.0 Военно-морской обсерватории США [2]) сейчас содержат около миллиарда звезд. Опыт показывает, что при наземных ПЗС-наблюдениях стандартной, не слишком высокой, точности (несколько сотых звездной величины) и стандартной методике автоматического поиска переменности по фотометрии удастся выявить изменения блеска у одной из 80—100 звезд. Таким образом, на сегодня сравнительно легкообнаружимы как переменные звезды около 10 млн объектов, то есть мы знаем всего около 2 % всех переменных звезд, которые можно открыть сравнительно простыми методами.

В последние годы как пример неполноты наших знаний обычно указывают на то, что во Вселенной барионная материя составляет всего около 4 %, а все прочее — это такие непонятые формы, как темная материя и темная энергия. В области выявления переменных звезд ситуация вдвое хуже, мы не знаем 98 % интересующих нас объектов!

Неполнота открытий — неверная статистика

Как только удастся повысить полноту открытий переменных звезд, сразу становится понятно, что неверными являются и многие наши статистические представления о них. Приведем пример, связанный с очень традиционной методикой открытий — по фотографическим пластинкам.

В ГАИШ МГУ с 1895 г. накапливается коллекция астрономических фотографий звездного неба. Наиболее значимую ее часть представляют пластинки, полученные в послевоенные годы на астрографе с диаметром объектива 40 см ($f = 160$ см), построенном в 1930-е гг. для Зоннебергской обсерватории, оказавшемся в СССР по репарациям и с 1950-х гг. эксплуатировавшемся на станции ГАИШ в Крыму (сейчас — Крымское представительство МГУ). На пластинках размером 30×30 см астрограф позволял фотографировать поля размером $10 \times 10^\circ$, предельная величина в центре поля зрения первоначально составляла около $17.5^m B$, но постепенно ухудшалась из-за возрастающей засветки. Фотографирование велось по программе, обеспечивавшей накопление для предусмотренных программой наблюдений полей сотен негативов, прежде всего для целей изучения звездной переменности.

В настоящее время многие обсерватории ведут работу по переводу коллекций астронегативов в цифровую форму. Таким образом можно обеспечить неограниченно длительное хранение изображений, их пересылку, предоставление внешним пользователям, а также применение к изображениям различных эффективных методов обработки данных, разработанных для современных цифровых приемников света. В 2004 г. ГАИШ также приступил к дигитализации фототеки с использованием современных сканеров. Получаемые файлы имеют разрешение около 2 500 точек на дюйм, что позволяет избежать какой-либо потери полезной информации.

Оцифровка фототеки ГАИШ проводится параллельно с экспериментами по использованию числовых изображений для различных научных задач, прежде всего для открытия и исследования переменных звезд. К первому из целиком просканированных полей, в центре которого находится яркая звезда 66 Змееносца, была применена фотометрическая программа SExtractor [3], разработанная для ПЗС-наблюдений. Поиск переменных звезд обеспечивала созданная в России К. Соколовским и А. Лебедевым программа VaST [4]. Вопреки нашим достаточно скромным ожиданиям в поле размером $10 \times 10^\circ$ удалось открыть 480 новых переменных звезд [5]! Еще десятки звезд были заподозрены в переменности, и их постепенно подтверждают организованные в ГАИШ и ИНАСАН ПЗС-наблюдения.

Итак, даже при фотографической точности удастся открывать сотни неизвестных переменных звезд. Эти открытия наводят на мысль, что мы неправильно представляем себе статистику звездной переменности, что неудивительно, если вспомнить, что она создавалась на основе информации о малой доле всех переменных звезд.

И действительно, уже результаты, полученные для поля 66 Оph, не вполне согласуются с нашими представлениями о частоте встречаемости переменных звезд некоторых типов. Так, всегда считалось, что среди короткопериодических пульсирующих звезд типа δ Щита таких объектов, у которых амплитуда в фотографических или визуальных лучах составляет не менее 0.2 звездных величин (их сейчас обычно называют HADS — High-Amplitude Delta Scuti stars), весьма мало. На весь ОКПЗ их было на 2010 г. всего 121. Наше поле по площади составляет 0.24 % всей небесной сферы, но в нем оказалось 11 звезд типа HADS (10 из них — новые); экстраполяция на все небо дала бы около 5 000 звезд этого типа. Интересно, что речь идет именно о звездах типа δ Щита *с большой амплитудой переменности*; их «недооткрытие» не может быть связано с селекцией по амплитуде. Скорее всего, старые методы выявления переменных звезд плохо работали со звездами, имеющими очень короткие периоды переменности.

Такой вывод, похоже, подтверждается статистикой наших открытий переменных звезд самого распространенного в нашей выборке типа — затменных двойных. Для всех их подтипов (Алголей, звезд типа β Лиры и типа W Большой Медведицы) мы открыли в поле 66 Оph большую долю звезд с короткими периодами, чем представленная в ОКПЗ.

Наблюдает робот

Фотографические наблюдения — хорошо, но мы живем в век ПЗС-фотометрии. За последние десятилетия открыт свободный доступ к фотометрическим данным нескольких автоматизированных обзоров звездного неба. Большинство обзоров выполнены на малых инструментах, имеют довольно плохое угловое разрешение, но позволяют получить для интересующей исследователя звезды большое, а иногда очень большое количество фотометрических наблюдений. Назовем лишь важнейшие из них. Обзор ASAS-3 [6] покрывает все южное небо и экваториальную область, содержит фотометрию в полосе, очень близкой к стандартной V , для нескольких миллионов

звезд примерно до 14-й величины, причем для многих звезд доступны сотни фотометрических оценок. Масштаб телескопа, определяющий угловое разрешение, — $15.5''$ на пиксель. Наблюдения покрывают интервал времени с 2000 г. почти до наших дней. Примерно такие же угловое разрешение и предельную величину имеет обзор северного неба и экваториальной области ROTSE-I/NSVS [7], но звездные величины там приводятся в инструментальной красной системе и охватывают менее года. С начала 2012 г. доступен великолепный по предельной величине (около 19) и угловому разрешению обзор Catalina [8], охватывающий, подобно ASAS-3, несколько лет наблюдений. Его звездные величины прокалиброваны по звездным величинам стандартов в системе V , но фотометрическая полоса не вполне стандартная, ее многие предпочитают обозначать CV .

Наличие свободного доступа к большим массивам ПЗС-фотометрии привело к развитию нового метода открытия и исследования переменных звезд — data mining (устоявшегося русского термина пока нет). Авторы наблюдений не успевают их осмысливать и открывают к ним свободный доступ; другие исследователи, профессиональные астрономы и любители астрономии, ищут в массивах данных новые переменные звезды, зачастую специально разыскивая необычные объекты, интересующие автора исследования редкие типы.

Нередко такие «раскопки в данных» существенно меняют наши представления о статистике переменных звезд. Так, большинство известных в нашей Галактике бимодальных цефеид, пульсирующих одновременно в первом и втором обертонах радиальных пульсаций — 11 из 15 — открыл и исследовал методами data mining аспирант ИНАСАН Хруслов [9]. Одним из самых распространенных типов переменности становятся звезды типа BY Dra (их изменения блеска обусловлены осевым вращением звезды с крупными пятнами на поверхности): достаточно по данным фотометрических обзоров установить квазипериодическую переменность слабой звезды, идентифицируемой с рентгеновским источником, и классификация становится почти однозначной. Удастся открыть новые переменные звезды редких, ранее почти не выявлявшихся типов. Так, Антипин и Юрчик [10] обнаружили по данным ASAS-3 бимодальную переменную типа RR Лиры с отношением двух периодов 0.96, видимо, речь идет о нерадиальной и радиальной модах, возбужденных на близких частотах. Хруслов [11] нашел, также по данным ASAS-3, затменную переменную с периодом 8.3^d , у которой одновременно наблюдается

довольно правильная волна с периодом 312^d ; подобные переменные известны в Магеллановых Облаках. Можно полагать, что долгопериодическая волна связана с прецессией аккреционного диска, хотя такая интерпретация не является единственно возможной.

А теперь — в космос

Новый уровень фотометрической точности дают космические эксперименты. В последние годы несколько космических аппаратов выведены на орбиту специально для поисков фотометрической переменности звезд со сверхмалой амплитудой. Это связано прежде всего с поисками прохождений планет по дискам звезд и с некоторыми другими задачами.

Как известно, первое прохождение экзопланеты по диску звезды (HD 209458, ставшей в ОКПЗ переменной звездой V376 Peg нового типа EP — «затменной» переменной с ослаблениями блеска, связанными с планетами) было обнаружено фотометрически при наземных наблюдениях не слишком высокой точности [12]. Амплитуда этих ослаблений составляет около 0.02^m , что вполне обнаружимо даже при любительских ПЗС-наблюдениях. Однако наблюдения HD 209458 из космоса, скажем, выполненные космическим телескопом имени Хаббла [13] с точностью около 0.0001^m , дают кривую блеска совершенно иного качества. Подобные наблюдения позволяют уточнить степень потемнения звезды к краю, в результате чего сразу выявляются проблемы астрофизической теории [14]. Для некоторых звезд при прохождении планеты по диску космические наблюдения выявляют искажения кривой блеска, когда планета покрывает группу пятен на поверхности звезды!

Наиболее сильное впечатление производит обнаружение у HD 209458 вторичного затмения (когда планета заходит за диск звезды), а также фазового эффекта (сразу после главного затмения видимый диск планеты темный, а непосредственно перед вторичным затмением он полностью освещен). Оба эффекта были обнаружены [15] при наблюдениях европейского спутника Corot, на котором установлен телескоп диаметром всего 27 см. Полная амплитуда и фазового эффекта, и вторичного затмения составляет 10^{-4}^m .

Более крупный телескоп диаметром 95 см установлен на спутнике Kepler американского космического агентства NASA. Этот спутник имеет очень специфическую программу наблюдений. Он постоянно следит за полем на границе созвездий Лебедя, Лиры и Дракона, отслеживая возможные изменения блеска примерно 150 000 звезд. К февралю 2012 г. было обнаружено свыше 2 300 кандидатов в экзопланеты у 1 790 звезд; 105 планет подтверждены последующими, прежде всего спектральными, наблюдениями. Открыто около 2 200 новых затменных переменных звезд. Среди переменных звезд, обнаруженных в проекте Kepler, есть удивительные сочетания затменной и физической переменности, причем на кривых блеска с амплитудой в несколько тысячных звездной величины четко видны значимые детали [16].

Весьма интересные результаты обеспечивает непрерывность наблюдений. В область неба, наблюдения которой проводит Kepler, случайно попала переменная звезда RR Лиры — прототип важного класса звездной переменности. Ее кривая блеска ясно показывает почти всегда присутствующее чередование чуть более высоких и чуть более низких максимумов [17]. Масштаб явления — около 0.02^m , то есть оно могло быть обнаружено с Земли. Однако основной пульсационный период RR Lyr очень близок к половине суток, и если нечетные максимумы видны по ночам, то четные попадают на светлое время суток, и наоборот. А на длительных интервалах блеска все изменения кривой блеска списывали на эффект Блажко, который у RR Lyr не только наблюдается и давно известен, но и сам сильно непостоянен.

Необыкновенно эффектными оказались кеплеровские кривые блеска карликовых новых V1504 Лебедя и V344 Лиры, покрывающие свыше 2 лет со скважностью около 1 мин времени [18]. На них видны многочисленные обычные вспышки и сверхвспышки, сверхгорбы во время сверхвспышек, множество тонких деталей.

В рамках нашей лекции интереснее другой предварительный результат проекта Kepler, относящийся к статистике переменных звезд. Басри и др. [19] отмечают, что из примерно 150 000 звезд программы около 60 000 оказываются периодическими переменными звездами, а около 34 000 также меняют блеск, но неправильным образом или с плохо выраженной периодичностью. При такой статистике из миллиарда каталогизированных звезд открытие переменности можно ожидать более чем для полумиллиарда! Разумеется, составление

специализированного каталога *переменных* звезд в такой ситуации полностью потеряет смысл.

Так что же нас ждет?

С одной стороны, будущее исследований переменных звезд представляется совершенно блестящим. Практически все звезды переменны, а изучение изменений блеска, сопутствующих им спектральных изменений позволяет выйти на совершенно иной уровень исследования звездных характеристик, звездной эволюции.

С другой стороны, перспективы работ над каталогами переменных звезд не вполне ясны. Обозначения звезд в системе ОКПЗ, основанные еще Ф. Аргеландером, удобны и позволяют легко вводить запоминающиеся названия для новых типов переменности. Однако давать звездам такие обозначения, параллельно проводя классификацию по принятой в ОКПЗ схеме и хотя бы до какой-то степени авторизуя вводимые в каталог сведения о звездах, станет совершенно невозможным, как только счет новых открытий пойдет на сотни тысяч. Мы ставили вопрос о будущем каталогов переменных звезд перед Комиссией 27 «Переменные звезды» Международного астрономического союза, но приемлемого решения пока не найдено.

Нам представляется, что в ближайшие десятилетия главную роль будут играть огромные общие каталоги *звезд*, в которых несколько столбцов будут посвящены информации о переменности блеска.

Работы по исследованию и каталогизации переменных звезд частично поддержаны РФФИ (проект 11-02-00495) и программой Президиума РАН «Происхождение, строение и эволюция объектов Вселенной». Мы благодарим коллектив Общего каталога переменных звезд за преданность делу, многолетнюю упорную работу.

Библиографические ссылки

1. *Самусь Н. Н.* О новейшей истории каталогов переменных звезд // Историко-астроном. исслед. — 2009. — Т. 34. — С. 69—96.
2. *Monet D. J., Levine S. E., Canzian B. et al.* The USNO-B catalog // Astron. J. — 2003. — Vol. 125. — P. 984—993.
3. *Bertin E., Arnouts S.* SExtractor: Software for source extraction // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1996. — Vol. 117. — P. 393—404.

4. *Sokolovsky K., Lebedev A.* POISK — a SExtractor front-end for search of variable objects in series of CCD images : 12th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv : Kyiv University Press, 2005. — P. 79.
5. *Колесникова Д. М., Сам Л. А., Соколовский К. В. и др.* Новые переменные звезды на оцифрованных пластинках московской фототеки. Поле 66 Змееносца // Астрон. журн. — 2010. — Т. 87. — С. 1085—1105.
6. *Pojmanski G.* The All Sky Automated Survey // *Acta Astronomica.* — 1997. — Vol. 47. — P. 467—481.
7. *Woźniak P. R., Vestrand W. T., Akerlof C. W. et al.* Northern Sky Variability Survey: public data release // *Astron. J.* — 2004. — Vol. 127. — P. 2436—2449.
8. *Drake A. J., Djorgovski S. G., Mahabal A. et al.* First results from the Catalina real-time transient survey // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 696. — P. 870—884.
9. *Khruslov A. V.* A search for double-mode pulsating variables // *Baltic Astronomy* (accepted).
10. *Antipin S., Jurcsik J.* ASAS 081933-2358.2: RRc-type variable with two closely spaced frequencies // *Inf. Bull. Variable Stars.* — 2005. — Vol. 5632. — P. 1—3.
11. *Khruslov A. V.* Unusual variability of TYC 5978 00472 1 // *Переменные звезды (приложение).* — 2011. — Vol. 11. — P. 17.
12. *Jha S., Charbonneau D., Garnavich P. M. et al.* Multicolor observations of a planetary transit of HD 209458 // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 540. — P. L45—L48.
13. *Brown T. M., Charbonneau D., Gilliland R. L. et al.* Hubble Space Telescope time-series photometry of the transiting planet of HD 209458 // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 552. — P. 699—709.
14. *Абубекеров М. К., Гостев Н. Ю., Черепашук А. М.* Анализ кривых блеска затменных систем с экзопланетами. Система HD 209458 // Астрон. журн. — 2010. — Т. 87. — С. 1199—1220.
15. *Snellen I. A. G., de Mooij E. J. W., Albrecht S.* The changing phases of extrasolar planet CoRoT-1b // *Nature.* — 2009. — Vol. 459. — P. 543—545.
16. *Greaves J.* A couple of Kepler eclipsers and a BY Draconis star // *Переменные звезды (приложение).* — 2010. — Vol. 10. — P. 7.

17. *Kolenberg K., Bryson S., Szabó R. et al.* Kepler photometry of the prototypical Blazhko star RR Lyr: an old friend seen in a new light // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 411. — P. 878—890.
18. *Cannizzo J. K., Smale A. P., Wood M. A. et al.* The Kepler light curves of V1504 Cygni and V344 Lyrae: a study of the outburst properties // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 747. — P. 117.
19. *Basri G., Walkowicz L., Batalha N. et al.* Photometric variability in Kepler target stars. II. An overview of amplitude, periodicity, and rotation in first quarter data // *Astron. J.* — 2011. — Vol. 141. — P. 20.

ПОЗДНИЕ СТАДИИ ЭВОЛЮЦИИ КОМПАКТНЫХ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

В лекции описываются сценарии эволюции таких тесных двойных звездных систем, в результате которых возникают два наиболее мощных взрывных явления в мире звезд — сверхновые типа Ia (*SNIa*) и гамма-барстеры. Для *SNIa* приведены условия накопления предельной массы вырожденным карликом. Показано, что процесс аккреции может сопровождаться появлением источника сверхмягкого рентгеновского излучения, соответствующего светимости $1\text{--}10^4 L_\odot$. Гамма-барстеры рассматриваются как явление, сопровождающее формирование и быструю эволюцию компактного аккреционно-декреционного диска при возникновении релятивистских объектов — черных дыр и нейтронных звезд. Приведены численные модели эволюции некоторых тесных двойных систем, приводящие к взрывам *SNIa* и возникновению гамма-барстеров.

The lecture presents the scenarios of the evolution of close binaries resulting in the most intensive explosive phenomena in the stellar Universe—Type Ia supernovae and gamma-ray bursts. For Type Ia supernovae we derive the conditions for the accumulation of the limiting mass by the degenerate dwarf in the close binary. Accretion onto the degenerate dwarf can be accompanied by supersoft X-ray radiation with luminosity $1\text{--}10^4 L_\odot$. Gamma-ray bursts are believed to accompany the formation and rapid evolution of compact accretion–decretion disks during the formation of relativistic objects—black holes and neutron stars. Numerical models of the evolution of some close binaries that result in Type Ia supernovae explosions and gamma-ray bursts in our Galaxy for various evolutionary scenarios are presented.

Природа Сверхновых типа Ia

В основе всех современных моделей сверхновых типа Ia (*SNIa*) лежит идея о тепловой неустойчивости термоядерных реакций в звездном вырожденном веществе, ведущей к детонации ядерного топлива [1]. Хойл и Фаулер [2] показали, что приближение в ходе аккреции массы вырожденного углеродно-кислородного (CO) карлика к

чандрасекаровской массе вызывает его сжатие, нагрев и термоядерный взрыв масштаба сверхновой звезды. Выделение энергии обеспечивается горением СО-смеси и радиоактивной цепочкой $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$. «Стандартность» кривых блеска и энергосвечения определяется универсальностью величины чандрасекаровской массы и сходством химического состава карликов в момент взрыва. Отсутствие наблюдаемых линий водорода и гелия в спектре *SNIa* исключает из числа их предшественников красные сверхгиганты с СО-ядром. Поэтому все сценарии для этих сверхновых, предложенные за последние несколько десятков лет, основаны на росте массы СО-карлика в ходе аккреции вещества спутников различной природы, входящих в состав подходящих ТДС (рис. 1). Исходно первичный компонент ТДС при этом служит предшественником достаточно массивного вырожденного СО-карлика, а вторичный компонент — источником вещества для увеличения массы карлика до критической.

Необходимо отметить, что наиболее массивные вырожденные карлики, возникающие в ходе эволюции звезд с начальными массами около $10 M_{\odot}$, в результате выгорания углерода в их ядрах становятся кислородно-неоновыми (ONe). Горение кислорода и неона в ходе термоядерной вспышки таких карликов по достижении ими чандрасекаровской массы не приводит к взрыву *SNIa* из-за малой ядерной энергии топлива. В результате ONe-карлик коллапсирует с образованием нейтронной звезды *HЗ* [3], причем рекордно малых масс ($1.25 M_{\odot}$) [4] из-за релятивистского дефекта массы. В результате приходим к выводу, что, вероятно, только взрывы СО-карликов проявляют себя в качестве *SNIa* и являются основными производителями железа во Вселенной.

Оценка частоты *SNIa* в расчете на нашу Галактику составляет ~ 0.003 в год [5]. Она вытекает из сравнения наблюдаемой объемной частоты *SNIa* и наблюдаемой объемной скорости звездообразования. Другими словами, на $\sim 300 M_{\odot}$ вновь образованных звезд приходится одна сверхновая этого типа. Частота *SNIa* примерно в 10 раз меньше наблюдаемой суммарной частоты массивных сверхновых: *SNII*, *SN Ib,c* [5]. Интересно и важно, что частота *SNIa* оказалась связанной не только с массой родительской галактики, но и с историей звездообразования во Вселенной [6]. Максимум этой частоты достигается при $z \sim 1$. При больших красных смещениях ($z > 1.5$) частота *SNIa* уменьшается [7], что указывает на среднее время жизни их предшественников $\sim 3 \cdot 10^9$ лет. Интересно, что некоторая часть *SNIa*

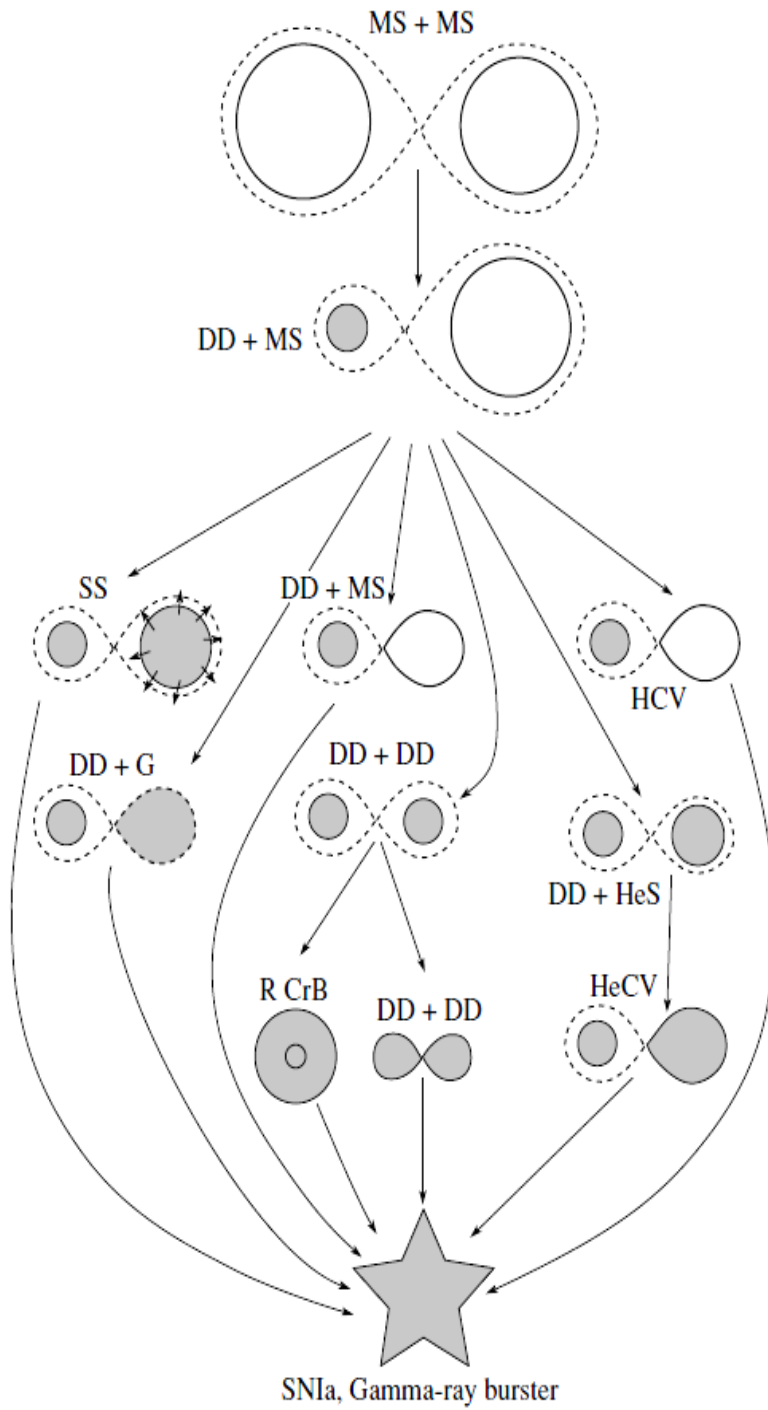


Рис. 1. Эволюционная схема для ТДС, заканчивающих свою эволюцию взрывами *SNIa*: *MS* — звезда главной последовательности; *DD* — вырожденный карлик; *G* — гигант; *SS* — симбиотическая звезда; *HeS* — гелиевая звезда; *HeCV* — гелиевая катаклизмическая звезда; *HCV* — катаклизмическая переменная со звездой ГП в качестве донора; *GRB* — гамма-барстер

имеет возраст менее 10^9 лет [8]. Для оценки минимального времени жизни предшественников *SNIa* было важным обнаружение почти четырехкратного увеличения их частоты у *E*-галактик с активным звездообразованием по сравнению с частотой у обычных «инертных» *E*-галактик [9]. Длительность вспышки звездообразования в галактике — порядка динамической шкалы времени галактики $\sim 10^8$ лет. Это значит, что и такого короткого времени достаточно для «вызревания» по крайней мере части предшественников этих сверхновых. Кроме того, поскольку *SNIa* встречаются и в обычных *E*-галактиках, это означает, что какая-то их часть имеет хаббловский (10^{10} лет) возраст. Очевидны большая дисперсия возрастов предшественников *SNIa* и, вероятно, действие нескольких сценариев их формирования.

Классификация основных сценариев, приводящих к взрывам *SNIa*

Изложим кратко основные сценарии, рассматриваемые в настоящее время в качестве наиболее вероятных производителей *SNIa* в порядке, определяемом рис. 1.

Симбиотические двойные звезды (SS)

Модель этих звезд была исторически первой, использующей идею двойственности предшественника [10]. Наблюдаемые системы такого рода состоят из красного (сверх)гиганта (возможно, иногда звезды типа *R CrB*) с интенсивным звездным ветром, близкого к заполнению своей полости Роша, и вырожденного карлика, аккрецирующего часть вещества ветра гиганта. Доля аккрецированного из звездного ветра вещества оценивается соотношением $(mR/Ma)^2$, где m и M — массы аккретора и донора, а R и a — радиус донора и большая полуось орбиты. Формула носит оценочный характер и получена в предположении, что скорость ветра — порядка параболической скорости на поверхности донора. Ясно, что при сравнимых массах компонентов и доноре, близком к заполнению своей полости Роша, вырожденный карлик симбиотической двойной может аккрецировать около 10 % вещества оболочки донора. Реккурентные вспышки горения водорода в слое, наблюдаемые у таких систем, поддерживают возможность накопления аккрецирующим карликом со временем критической массы и взрыва *SNIa*. Имеющееся ограничение на наблюдаемую скорость потери богатого водородом вещества для одной

SNIa ($\sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$) пока не дает возможность исключить этот сценарий даже для нее [11], тем более что имеются примеры *SNIa* с признаками наличия водорода в их оболочках [12] и наличия вещества звездного ветра с интенсивностью $\sim 3 \cdot 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$ в их окрестностях [13].

ТДС с донором-гигантом малой массы (DD + G)

Другая возможность обеспечить необходимую скорость обмена между компонентами связана с использованием полуразделенных систем с донорами-гигантами малых ($0.8\text{--}1.2 M_{\odot}$) масс, обладающими вырожденными гелиевыми ядрами [14]. Масса гелиевого ядра должна быть при этом $0.4\text{--}0.5 M_{\odot}$. Радиусы гигантов с такими массами $\sim 300\text{--}600 R_{\odot}$, а большие полуоси ТДС — около тысячи солнечных. Но образование массивного вырожденного СО-карлика требует расширения звезды-предшественницы до $R > 1\,000 R_{\odot}$. При этом спутник малой массы будет погружен в общую оболочку и уменьшит большую полуось своей орбиты до величины, меньшей $\sim 100 R_{\odot}$. Следовательно, прямое образование подходящих для этого сценария ТДС кажется невозможным. Однако двойные радиопульсары в шаровых скоплениях обнаруживают гелиевые вырожденные спутники в тесных системах с большими полуосями $100\text{--}600 R_{\odot}$ [15]. Такие системы в плотных скоплениях звезд образуются, вероятно, обменным захватом при столкновении двойных звезд с одиночными НЗ. Таким же образом в шаровых скоплениях могут возникать и достаточно широкие системы из массивных СО-карликов и звезд главной последовательности (ГП) с массами около солнечной. Но поскольку только малая (~ 0.01) часть звезд галактик включена в состав шаровых скоплений, этот сценарий имеет малую частоту реализации, определяемую в основном частотой обменных захватов, зависящей от многих параметров уже шаровых скоплений.

ТДС с донором-звездой ГП (DD+MS)

Давно известно, что если отношение масс компонентов при заполнении полости Роша донором с радиативной оболочкой превышает ~ 1.2 , то обмен веществом происходит в тепловой шкале донора [16]. Донор при этом может быть звездой ГП подходящей массы (рис. 1). Оценки показывают, что масса донора при этом должна быть около $2 M_{\odot}$, чтобы обеспечить эффективный рост массы карлика. Условие

квазистационарного горения водорода и гелия в слоевых источниках сферически-симметрического карлика при солнечном химическом составе

$$dM_{CO}/dt = (0.3 \div 1) \cdot 10^{-6} (M_{CO}/M_{\odot} - 0.5), \quad M_{\odot}/year \quad (1)$$

подтверждается расчетами численного моделирования [17]. Для оценки потенциальной частоты различных каналов производства *SNIa* в нашей Галактике используем найденную нами ранее функцию, описывающую начальное распределение ТДС по основным параметрам [18]:

$$d^3N = 0.2 d \lg(a/R_{\odot}) \cdot (M_1/M_{\odot})^{-2.5} \cdot (dM_1/M_{\odot}) \cdot dq, \quad year^{-1}. \quad (2)$$

Эта формула дает частоту таких *SNIa*, равную $\sim 10^{-5}$ в год. Ясно, что данный сценарий может обеспечить только малую часть взрывов *SNIa*. Возраст таких *SNIa* составляет $\sim 10^9$ лет.

ТДС с донором — вырожденным карликом (DD+DD)

На сегодня наиболее перспективным сценарием считается слияние двойных вырожденных СО-карликов (рис. 1) с общей массой выше чандрасекаровской [18]. Теоретическая оценка частоты подобных событий составляет ~ 0.003 в год [19].

Наблюдения подтверждают существование таких двойных вырожденных карликов [20]. Слияние гелиевых вырожденных карликов с СО-карликами дает звезды с вытянутыми гелиевыми оболочками типа *R CrB* [18] с частотой ~ 0.01 в год [19]. Высокая скорость потери массы последними, сопоставимая или даже выше скорости горения гелия на дне вытянутой гелиевой оболочки, делает взрывы их СО-ядер маловероятными, хотя и возможными при достаточно массивном СО-карлике. Этот сценарий нуждается в дополнительном численном исследовании, ибо он допускает существование сверхновых звезд без водорода, но с гелием в вытянутой оболочке *R CrB*.

Чтобы проиллюстрировать данный сценарий, приведем результаты расчетов эволюции ТДС, в которой донором является проэволюционировавшая вырожденная гелиевая звезда на стадии выгорания гелия в ядре. Начальная масса гелиевой звезды равна $1 M_{\odot}$, а начальная масса аккретора $1.3 M_{\odot}$. Как показывают расчеты (рис. 2), темп потери массы вырожденным карликом может достигать половины стационарного горения как на начальных фазах эволюции (трек

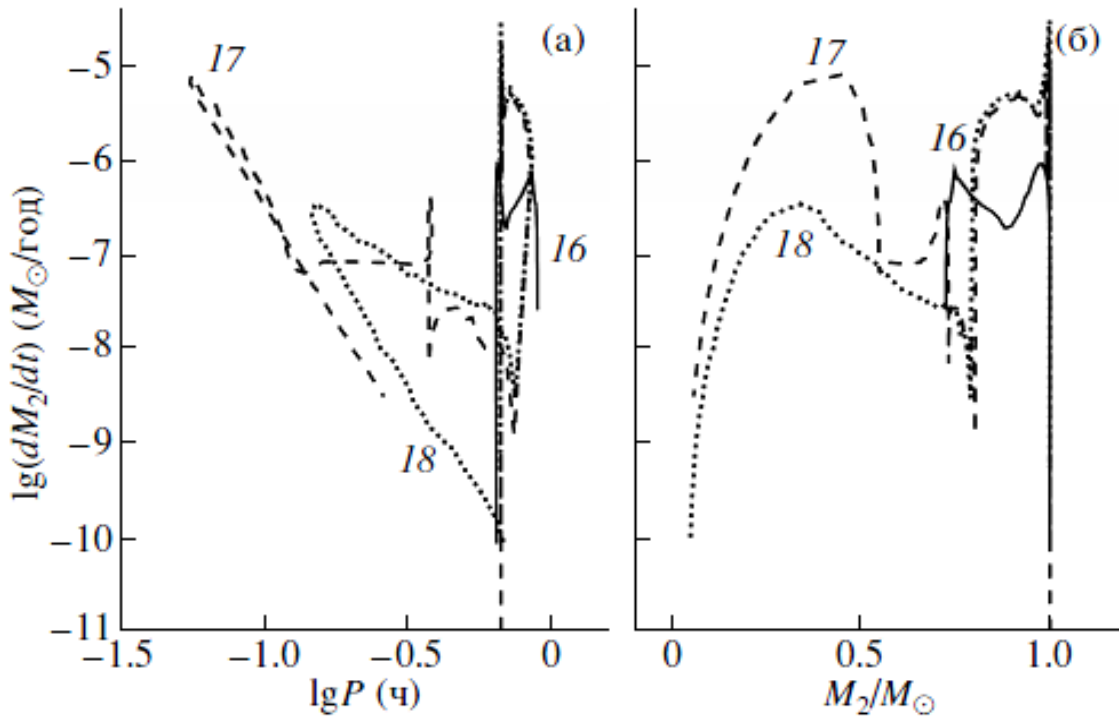


Рис. 2. Теоретические эволюционные треки ТДС с донором — вырожденным карликом: а — диаграмма «логарифм орбитального периода — логарифм темпа потери массы донором»; б — диаграмма «масса донора — логарифм темпа потери массы донором». Цифрами указаны номера треков, основные параметры которых даны в таблице [17]

17), так и на более поздних (трек 18), в зависимости от начального содержания гелия в ядре донора. Однако для трека 16, соответствующего более проэволюционировавшему донору, темп потери массы карликом существенно понижается. Отметим, что стационарное горение гелия в оболочке карлика обеспечивает условие центральной детонации углерода в карлике [21].

ТДС с донором — невырожденной гелиевой звездой (DD+HeS)

Донором вырожденного карлика может быть и невырожденная гелиевая звезда малой массы, заполняющая свою полость Роша [22]. Примером такой ТДС может служить система, состоящая из гелиевой звезды с массой $1.6 M_{\odot}$ в паре с СО-карликом с массой $1 M_{\odot}$ (*V445 Pup*). Результаты численного моделирования эволюции таких систем представлены на рис. 3.

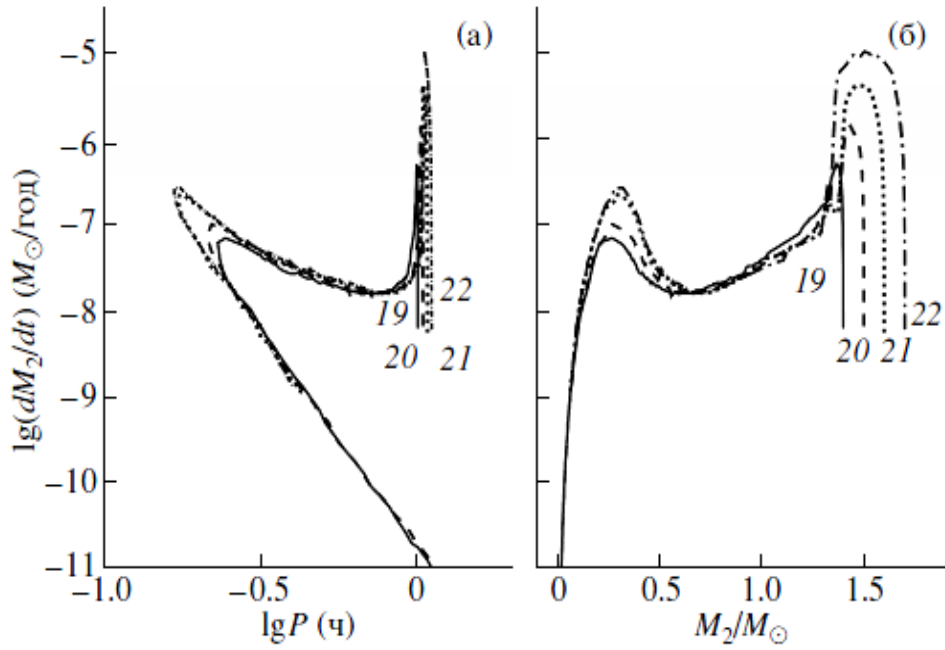


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, для донора — невырожденной гелиевой звезды

Допустимые массы гелиевой звезды в этом случае, согласно нашим моделям, составляют $1.4\text{--}1.7 M_{\odot}$. На начальной стадии обмена веществом темп потери массы донором в таких системах попадает в область стационарного горения гелия на поверхности аккретора. Обмен веществом происходит в тепловой шкале времени донора. Однако интервал начальных масс гелиевой звезды, для которого это имеет место, очень узок ($\sim 0.3 M_{\odot}$), и количество массы, потерянное донором на данном этапе, сравнительно невелико (не превышает $\sim 0.1 M_{\odot}$). ТДС такой природы наблюдаются [23]. Частота сценария с гелиевым донором $1.4\text{--}1.7 M_{\odot}$ из-за необходимости «тонкой» настройки параметров ТДС мала: $\sim 10^{-4}$ в год, что недостаточно для обеспечения наблюдаемой частоты *SNIa*. Отметим, однако, что в этом сценарии для СО-карлика нет необходимости набирать чандрасекаровскую массу при скорости обмена, заданной формулой, полученной на основе численных расчетов [24]:

$$dM_{CO}/dt = (0.3 \div 1) \cdot 10^{-5} (M_{CO}/M_{\odot} - 0.5), \quad M_{\odot}/year. \quad (3)$$

При меньших скоростях обмена можно аккумулировать $\sim 0.1 M_{\odot}$

гелия в оболочке СО-карлика [24] (треки 19—22). Горение гелия в такой оболочке может привести к двойной детонации и взрыву *SNIa*. Частота таких событий также не превосходит $\sim 10^{-4}$ в год.

Катаклизмические двойные звезды (HCV)

Долгое время наиболее привлекательной и универсальной моделью для *SNIa* были катаклизмические двойные звезды (см. рис. 1), в которых донором является маломассивная звезда ГП, заполняющая свою полость Роша [3]. Движущей силой эволюции таких систем, обеспечивающей необходимый высокий темп обмена веществом, является, вероятно, магнитный звездный ветер (МЗВ), который наиболее эффективен при начальных больших полуосях предкатаклизмических систем ($2.5\text{--}8 R_{\odot}$) [16]. Высокая скорость обмена необходима для обеспечения квазистационарного горения водорода и гелия. Сильные слоевые вспышки при этом исключаются, а вырожденный СО(ONe)-карлик становится на этой стадии SSS (ярким переменным источником сверхмягкого рентгеновского излучения подобно *RXJ 0513.9-6951* с периодом повторения вспышек 100—200 дней) со светимостью $\sim 10^4 L_{\odot}$. При такой светимости стационарное горение водорода и гелия в оболочках массивных СО(ONe)-карликов поддерживает температуру их фотосферы на уровне $10^5\text{--}10^6$ К. Такие СО(ONe)-карлики близки по своим свойствам к источникам сверхмягкого рентгеновского излучения, таким, как *CAL 83*, который имеет $T_e \sim 5.5 \cdot 10^5$ К, $M_{CO} \sim 1.3 M_{\odot}$; он был идентифицирован с тесной двойной с периодом около одного дня [25]. Другие SSS обнаружили орбитальные периоды от 2 ч до 600 сут. [26], подтверждая тем самым большое разнообразие систем, обеспечивающих квазистационарное горение водорода и, возможно, гелия в оболочках СО(ONe)-карликов. Часть их не успевает набрать критическую массу, часть является аккрецирующими черными дырами (ЧД), часть — массивными ядрами планетарных туманностей. Кроме того, часть SSS обнаружила концентрацию к спиральным рукавам галактик [27], что говорит об их молодости. Часть SSS является новыми звездами, остатками сверхновых, для части SSS нет идентификации [28].

Численное моделирование эволюции таких систем показывает возможность достижения необходимой скорости аккреции при начальной массе донора $1\text{--}1.5 M_{\odot}$ и аккретора $\sim 1 M_{\odot}$. Наблюдения обнаружили значительное число катаклизмических систем с суммой масс компонентов, большей $1.4 M_{\odot}$, например, *EY Cyg* и *CI Aql* [29].

При этом исходное отношение начальных масс компонентов на ГП составит ~ 0.1 . Теперь формула (2) дает оценку частоты *SNIa* в рамках этого сценария: $\sim 10^{-4}$ в год. Эта величина заметно меньше необходимой «наблюдаемой» величины ~ 0.003 в год, поэтому, вероятно, только часть *SNIa* может быть продуктом этого канала.

Классификация сценариев, приводящих к вспышкам гамма-барстеров

В результате коллапса быстровращающихся ядер сверхновых типов Ib, Ic (*SNIb,c*)-компонентов предельно тесных двойных систем, коллапса в нейтронные звезды аккрецирующих кислородно-неоновых вырожденных карликов чандрасекаровской массы, слияния НЗ с нейтронными звездами или черными дырами (ЧД) в ТДС образуются аккреционно-декреционные диски. Быстрая ($\sim 1 M_{\odot}/\text{с}$) аккреция вещества этих дисков центральной компактной релятивистской звездой приводит к выделению энергии $\sim 0.1 M_{\odot}^2 \sim 10^{53}$ эрг за время 0.1—1 000 с в виде гамма-квантов и нейтрино. Так генерируются вспышки гамма-барстеров.

По длительности вспышки ГБ делятся на длинные и короткие. Границей служит длительность ~ 2 с. Длинные ГБ оказались связанными с *SNIb,c*, которые являются продуктами взрыва гелиевых звезд в ТДС, ведущего к образованию НЗ и ЧД [30]. Короткие ГБ, не обнаруживая связи со сверхновыми, встречаются и в *E*-галактиках. Последнее дало возможность предположить слияние тесных двойных НЗ в качестве их источника [31]. Частота ГБ в расчете на нашу Галактику составляет $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ в год [32].

Замена вырожденного СО-карлика на ОNe-карлик меняет его судьбу по достижении в ходе аккреции предельной массы (рис. 4).

Вместо термоядерного взрыва *SNIa* ОNe-карлик, после выгорания ядерного топлива, коллапсирует с образованием НЗ. Начальные массы звезд, производящих ОNe-карлики, остаются неопределенными: 8—12 M_{\odot} [33]. Часть ОNe-карликов может возникнуть при словом горении углерода в СО-карликах. Коллапс ОNe-карликов ведет к образованию НЗ, но поскольку на предшествующей стадии аккреции карлик получил большой угловой момент из аккреционного диска, эта НЗ будет быстро вращаться. Теперь легко оценить при условии сохранения углового момента, что если масса аккрецированного вещества превышает $(r/R)^{1/2} \cdot M$, то продукт коллапса получит компактный аккреционно-декреционный диск, вероятно,

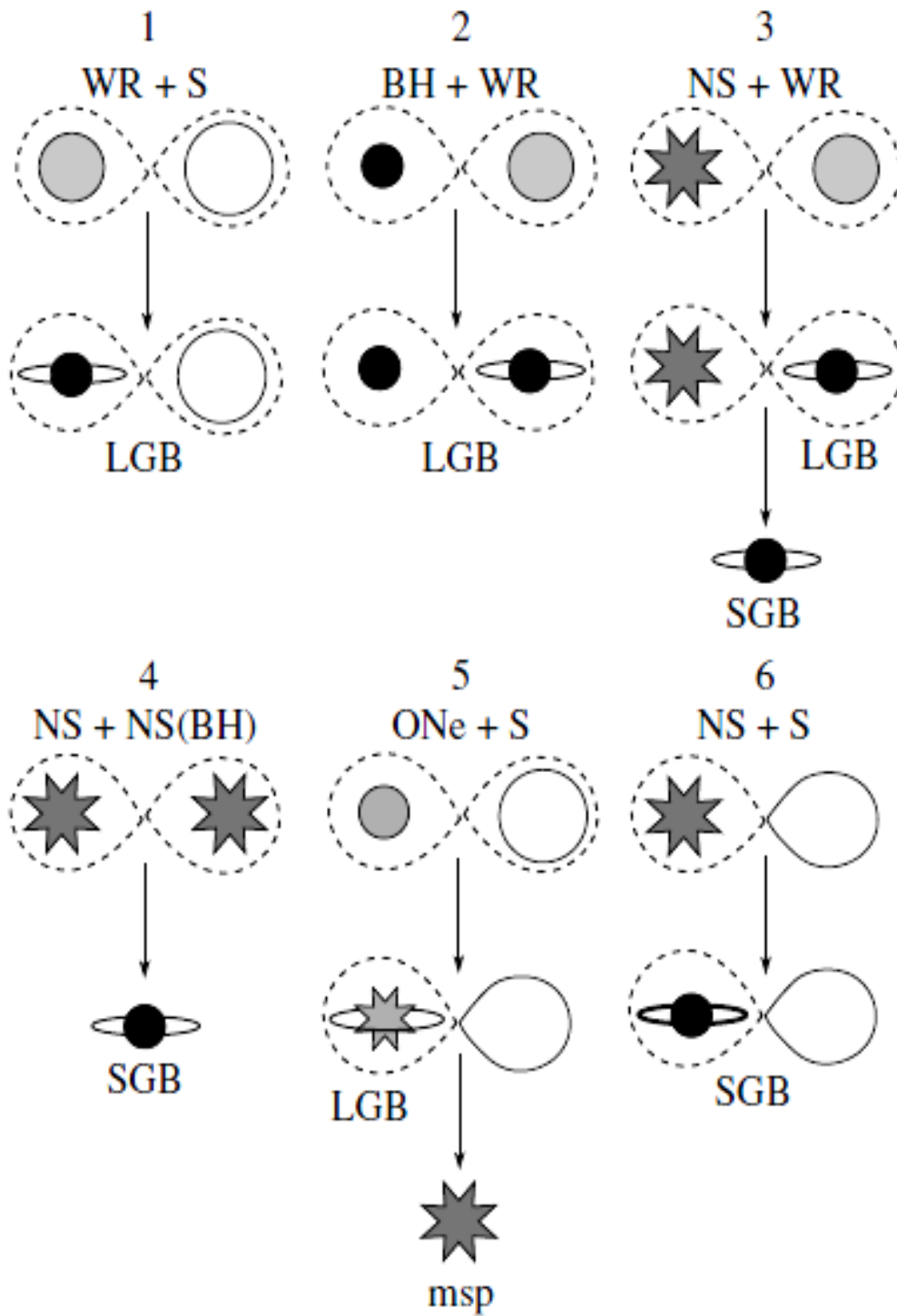


Рис. 4. Эволюционная схема ТДС, приводящая к явлениям гамма-барстеров: WR — звезда Вольфа—Райе; S — обычная звезда (некомпактная); BH — черная дыра; NS — нейтронная звезда; LGB — длинные гамма-барстеры; SGB — короткие гамма-барстеры; ONe — кислородно-неоновый карлик; mps — миллисекундный пульсар

необходимый для генерации гамма-барстеров (ГБ). Здесь r и R — радиусы продукта коллапса и вырожденного карлика соответственно, M — масса коллапсирующего карлика. Ясно, что аккреция более $\sim 0.08 M_{\odot}$ вещества ОNe-карликом в ТДС приведет к образованию компактного диска около молодой НЗ и, следовательно, к появлению ГБ. К такому же результату может привести и слияние двух ОNe-карликов (либо слияние ОNe- и СО-карликов). Частота таких слияний $10^{-5} \div 10^{-6}$ [34].

Сценарии длинных вспышек гамма-барстеров

На рисунке 4 представлены три сценария генерации длинных ГБ, связанных с коллапсом в керровскую ЧД ядер звезд Вольфа—Райе — членов ТДС [35]. Спутником синхронно вращающейся звезды Вольфа—Райе в ТДС с орбитальным периодом короче 1—2 дней может быть звезда ГП, ЧД или НЗ. Частота подобных событий остается довольно неопределенной из-за неопределенности предельного орбитального периода и оценивается сейчас как $\sim 10^{-4}$ в год [36]. Наблюдаемое отношение частоты $SN Ib, c$ к частоте ГБ близко к 100 [37]. Низкая наблюдаемая частота ГБ обусловлена тем, что только малая часть наиболее тесных и массивных предсверхновых дают ГБ, и тем, что вследствие коллимации излучения ГБ обнаружима только малая их часть. Предшественниками ТДС, производящих ГБ, могут быть системы типа *Cyg X-3*, а системами после ГБ — системы типа *V 518 Per* с орбитальными периодами в несколько часов [35]. Возможными предшественниками ГБ в системе, состоящей из звезды Вольфа—Райе в паре с ОВ-компонентом, могут быть такие системы, как *CQ Ser* ($P_{orb} = 1.6$ дня) и *B32* ($P_{orb} = 1.9$ дня) [38]. Интересно, что наблюдения некоторых сопровождающих длинные ГБ сверхновых обнаружили признаки присутствия интенсивного звездного ветра, предшествующего ГБ, и наличие водорода в нем [39]. Это обстоятельство поддерживает предложенный сценарий. Необходимым условием образования ЧД является превышение начальной массой звезды ГП величины $\sim 25 M_{\odot}$, а образования звезды Вольфа—Райе — величины $\sim 10 M_{\odot}$.

Сценарии коротких вспышек гамма-барстеров

Самая популярная модель для коротких ГБ предложена Пачинским [31]. Она предполагает, что слияние компонентов системы, состоящей из двух НЗ, под действием излучения гравитационных

волн обеспечит образование массивного компактного аккреционно-декреционного диска около более массивной НЗ после разрушения менее массивной (рис. 4). Частота подобных событий в Галактике $\sim 10^{-4}$ в год [40]. Учет коллимации их излучения в конус с раствором всего в несколько градусов дает для этой частоты оценку 10^{-6} — 10^{-7} в год, близкую к наблюдаемой [41]. Примечательно, что в E -галактиках обнаруживаются только короткие ГБ, что согласуется с этим сценарием, ибо время слияния системы из двух НЗ определяется ее большей полуосью в момент образования и может варьироваться в широких пределах: 10^7 — 10^{10} лет [40].

Теория & Наблюдения

Представленное в статье широкое рассмотрение возможных сценариев взрывов $SNIa$ в ТДС (см. рис. 1) и выполненное численное моделирование эволюции некоторых классов двойных систем оставляет возможность реализации практически для всех из них взрыва $SNIa$ с частотой $10^{-4} \sim 0.003$ в год на Галактику.

Наиболее привлекательным на сегодня вариантом остается слияние двойных вырожденных углеродно-кислородных карликов с общей массой, превосходящей чандрасекаровский предел. Этот сценарий позволяет объяснить и возможность задержки взрыва по сравнению со звездообразованием в широких пределах: 10^7 — $\sim 10^{10}$ лет. Наличие критической массы взрывающегося СО-карлика объясняет сходство кривых блеска $SNIa$. Предварительная оценка частоты таких событий близка к наблюдаемой. Однако необходимо заметить, что физика сложных процессов, протекающих между слиянием вырожденных карликов и взрывом $SNIa$, остается практически не изученной ни с теоретической, ни с наблюдательной точки зрения.

Возможность довольно длительного существования предсверхновых объектов, являющихся вырожденными карликами, окруженными массивными углеродно-кислородными дисками с вероятным очень быстрым звездным ветром, ставит наблюдательную задачу по идентификации таких объектов среди горячих звезд, аналогов горячих ядер планетарных туманностей со спектрами, похожими в отсутствие гелия на спектры звезд Вольфа—Райе типа C. Возможно также, что они могут проявлять себя как источники мягкого рентгеновского излучения. Поиск таких объектов — актуальная задача наблюдательной астрофизики.

Библиографические ссылки

1. *Gurevich L., Lebedinskii A.* // Vestn. Leningrad. Univ. — 1946. — Vol. 4.
2. *Hoyle F., Fowler W. A.* Nucleosynthesis in Supernovae // Astrophys. J. — 1960. — Vol. 132. — P. 565.
3. *Iben I., Jr., Tutukov A. V.* On the evolution of close binaries with components of initial mass between 3 solar masses and 12 solar masses // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 1985. — Vol. 58. — P. 661–710.
4. *Kitaura F. S., Janka H.-T., Hillebrandt W.* Explosions of O-Ne-Mg cores, the Crab supernova, and subluminal type II-P supernovae // Astron. Astrophys. — 2006. — Vol. 450. — P. 345–350. [arXiv:astro-ph/0512065](#).
5. *Scannapieco E., Bildsten L.* The Type Ia Supernova Rate // Astrophys. J. Lett. — 2005. — Vol. 629. — P. L85–L88. [arXiv:astro-ph/0507456](#).
6. *Sullivan M., Le Borgne D., Pritchett C. J. et al.* Rates and Properties of Type Ia Supernovae as a Function of Mass and Star Formation in Their Host Galaxies // Astrophys. J. — 2006. — Vol. 648. — P. 868–883. [arXiv:astro-ph/0605455](#).
7. *Dahlen T., Strolger L.-G., Riess A. G. et al.* High-Redshift Supernova Rates // Astrophys. J. — 2004. — Vol. 613. — P. 189–199. [arXiv:astro-ph/0406547](#).
8. *Barris B. J., Tonry J. L.* The Rate of Type Ia Supernovae at High Redshift // Astrophys. J. — 2006. — Vol. 637. — P. 427–438. [arXiv:astro-ph/0509655](#).
9. *Della Valle M., Panagia N., Padovani P. et al.* Why Are Radio Galaxies Prolific Producers of Type Ia Supernovae? // Astrophys. J. — 2005. — Vol. 629. — P. 750–756. [arXiv:astro-ph/0504087](#).
10. *Tutukov A. V., Yungel'son L. R.* Question of the origin and stage of evolution of the symbiotic stars // Astrophysics. — 1976. — Vol. 12. — P. 342–348.
11. *Lundqvist P., Mattila S., Sollerman J. et al.* High-resolution optical studies of nearby Type Ia supernovae // ArXiv Astrophysics e-prints. — 2003. [arXiv:astro-ph/0309006](#).

12. *Deng J., Kawabata K. S., Ohyama Y. et al.* Subaru Spectroscopy of the Interacting Type Ia Supernova SN 2002ic: Evidence of a Hydrogen-rich, Asymmetric Circumstellar Medium // *Astrophys. J. Lett.* — 2004. — Vol. 605. — P. L37—L40. [arXiv:astro-ph/0311590](#).
13. *Immler S., Brown P. J., Milne P. et al.* X-Ray Observations of Type Ia Supernovae with Swift: Evidence of Circumstellar Interaction for SN 2005ke // *Astrophys. J. Lett.* — 2006. — Vol. 648. — P. L119—L122. [arXiv:astro-ph/0607620](#).
14. *Whelan J., Iben I., Jr.* Binaries and Supernovae of Type I // *Astrophys. J.* — 1973. — Vol. 186. — P. 1007—1014.
15. *Camilo F., Rasio F. A.* Pulsars in Globular Clusters. — 2005. — Vol. 328, Ser. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — P. 147. [arXiv:astro-ph/0501226](#).
16. *Масевич А. Г., Тутуков А. В.* Эволюция звезд: теория и наблюдения. — М. : Наука, 1988.
17. *Tutukov A. V., Fedorova A. V.* Formation and evolution of Ae and Be stars // *Astronomy Reports.* — 2007. — Vol. 51. — P. 847—862.
18. *Iben I., Jr., Tutukov A. V.* Supernovae of type I as end products of the evolution of binaries with components of moderate initial mass (M not greater than about 9 solar masses) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1984. — Vol. 54. — P. 335—372.
19. *Tutukov A. V., Yungelson L. R.* A Model for the Population of Binary Stars in the Galaxy // *Astronomy Reports.* — 2002. — Vol. 46. — P. 667—683.
20. *Nelemans G., Napiwotzki R., Karl C. et al.* Binaries discovered by the SPYproject. IV. Five single-lined DA double white dwarfs // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 440. — P. 1087—1095. [arXiv:astro-ph/0506231](#).
21. *Martin R. G., Tout C. A., Lesaffre P.* Critical mass transfer in double-degenerate Type Ia supernovae // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 373. — P. 263—270. [arXiv:astro-ph/0609192](#).
22. *Tutukov A. V., Fedorova A. V.* Origin and evolution of close binary stars with helium donors // *Астрон. журн.* — 1989. — Vol. 66. — P. 1172—1188.

23. *Oliveira A. S., Steiner J. E., Cieslinski D.* WR 7a: a V Sagittae or a qWR star? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003. — Vol. 346. — P. 963—967. [arXiv:astro-ph/0309043](#).
24. *Iben I., Jr., Tutukov A. V.* Model stars with degenerate dwarf cores and helium-burning shells — A stationary-burning approximation // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 342. — P. 430—448.
25. *Iben I., Jr., Tutukov A. V.* Helium star cataclysmics // *Astrophys. J.* — 1991. — Vol. 370. — P. 615—629.
26. *Kahabka P.* Super Soft Sources // *ArXiv Astrophysics e-prints.* — 2002. [arXiv:astro-ph/0212037](#).
27. *Di Stefano R., Kong A. K. H.* Luminous Supersoft X-Ray Sources in External Galaxies // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 592. — P. 884—899. [arXiv:astro-ph/0301162](#).
28. *Orio M.* A Close Look at the Population of Supersoft and Quasi-soft X-Ray Sources Observed in M31 with XMM-Newton // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 643. — P. 844—862. [arXiv:astro-ph/0512016](#).
29. *Bianchini A., Tamburini F., Johnson P. E.* Do magnetic fields contribute to the dynamical stability of the secondaries of CVs against mass transfer? // *ArXiv Astrophysics e-prints.* — 2006. [arXiv:astro-ph/0602157](#).
30. *Tutukov A. V., Chugai N. N.* The origin of type Ib supernovae // *Soviet Astronomy Letters.* — 1992. — Vol. 18. — P. 242.
31. *Paczynski B.* Gamma-ray bursters at cosmological distances // *Astrophys. J. Lett.* — 1986. — Vol. 308. — P. L43—L46.
32. *Chincarini G., Fiore F., Della Valle M. et al.* Gamma-Ray Bursts: Learning about the Birth of Black Holes and Opening new Frontiers for Cosmology // *The Messenger.* — 2006. — Vol. 123. — P. 54.
33. *Ritossa C., García-Berro E., Iben I., Jr.* On the Evolution of Stars that Form Electron-degenerate Cores Processed by Carbon Burning. V. Shell Convection Sustained by Helium Burning, Transient Neon Burning, Dredge-out, URCA Cooling, and Other Properties of an 11 M_☉ Population I Model Star // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 515. — P. 381—397.
34. *Tutukov A. V., Yungelson L. R.* A Model for the Population of Binary Stars in the Galaxy // *Astronomy Reports.* — 2002. — Vol. 46. — P. 667—683.

35. *Tutukov A. V., Cherepashchuk A. M.* Wolf-Rayet Stars, Black Holes, and Gamma-Ray Bursters in Close Binaries // *Astronomy Reports*. — 2003. — Vol. 47. — P. 386—400.
36. *Bogomazov A. I., Lipunov V. M., Tutukov A. V.* Evolution of close binaries and gamma-ray bursts // *Astronomy Reports*. — 2007. — Vol. 51. — P. 308—317. [arXiv:astro-ph/0607329](#).
37. *Della Valle M.* Supernova and GRB connection: Observations and Questions. — 2006. — Vol. 836, Ser. American Institute of Physics Conference Series. — P. 367—379. [arXiv:astro-ph/0604110](#).
38. *Postnov K. A., Cherepashchuk A. M.* Wolf-Rayet Stars and Cosmic Gamma-ray Bursts // *Astronomy Reports*. — 2001. — Vol. 45. — P. 517—526.
39. *Eldridge J. J., Genet F., Daigne F., Mochkovitch R.* The circumstellar environment of Wolf-Rayet stars and gamma-ray burst afterglows // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 367. — P. 186—200. [arXiv:astro-ph/0509749](#).
40. *Tutukov A. V., Yungelson L. R.* Merging of Binary White Dwarfs Neutron Stars and Black-Holes Under the Influence of Gravitational Wave Radiation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1994. — Vol. 268. — P. 871.
41. *Matsubayashi T., Yamazaki R., Yonetoku D. et al.* Absolute Rate, Evolving Luminosity function, and Evolving Jet Opening Angle Distribution for Long Gamma-Ray Bursts // *Progress of Theoretical Physics*. — 2005. — Vol. 114. — P. 983—993. [arXiv:astro-ph/0509276](#).

Краткие сообщения семинара

И. И. Антохин

Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга

РЕНТГЕНОВСКИЕ СВОЙСТВА МАССИВНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ: ТЕОРИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ

Массивные горячие звезды спектральных типов ОВ и Вольфа—Райе (WR) обладают мощными сверхзвуковыми ветрами. Как одиночные, так и двойные звезды этих типов являются источниками рентгеновского излучения. Для одиночных звезд общепризнанной является точка зрения, что их рентгеновское излучение формируется в гидродинамических ударных волнах, образующихся как результат внутренней неустойчивости ветра, движимого давлением излучения. В случае двойной звезды, состоящей из двух горячих компонент с ветрами, дополнительным механизмом формирования рентгеновского излучения должно являться столкновение этих ветров.

В настоящем докладе я обсуждаю механизмы формирования рентгеновского излучения в одиночных и двойных звездах ранних типов, а также сравниваю предсказания теории с наблюдениями таких звезд с бортов современных рентгеновских обсерваторий XMM-Newton и Chandra.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-02-00258, а также гранта «Ведущие научные школы России» НШ-2374.2012.2.

Д. В. Бисикало¹, П. В. Кайгородов¹, В. А. Устюгов¹
А. Г. Жилкин^{1, 2}, М. М. Montgomery³

¹Институт астрономии РАН

²Челябинский государственный университет

³Department of Physics, University of Central Florida, USA

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ МАГНИТНОЙ ОСИ БЕЛОГО КАРЛИКА НА ЭВОЛЮЦИЮ АККРЕЦИОННОГО ДИСКА В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПОЛЯРАХ

По результатам трехмерного численного моделирования рассмотрен процесс формирования аккреционных дисков в типичных промежуточных полярах с дипольным магнитным полем ($B_a \sim 10^5$), наклоненным к оси вращения системы. Обнаружена зависимость между наклоном магнитной оси и темпом аккреции на белый карлик, который определяется генерацией магнитного поля и магнитным торможением. В системах с наклоном магнитной оси, отличным от 0 и 90°, возникает наклоненный диск. Установлено, что в начальный момент времени в системе формируется разреженный аккреционный диск, положение которого целиком определяется магнитным полем аккретора. По мере роста массы диска на определенном этапе он перестает следовать за магнитным полем. Диск практически неподвижен в лабораторной системе координат, так как приливное воздействие звезды-донора приводит к ретроградному движению линии апсид диска с периодом, лишь на несколько процентов превышающим орбитальный. В результате струя вещества из L_1 подходит к диску то над его поверхностью, то под ним. Этот эффект приводит к воспроизводству наклоненности диска даже для систем, где струя лежит в орбитальной плоскости системы. Анализ результатов расчетов показывает, что в системе доминируют процессы, приводящие к уменьшению первоначальной наклоненности диска. Установлено, что основным эффектом, определяющим время жизни наклоненного диска, является темп подпитки внутренних частей диска веществом струи. По мере поступления вещества струи растет радиус внутренней области диска и по достижении этой областью радиуса последней устойчивой орбиты аккреционный диск перестает быть наклоненным. Показано, что время жизни наклоненного диска может составлять от десятков до десятков тысяч орбитальных периодов.

30 ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ ЗАТМЕННО-ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД

В сообщении представлены результаты фотометрических и спектральных исследований затменных переменных звезд на основе наблюдений, выполненных автором на телескопах Коуровской астрономической обсерватории УрГУ — УрФУ и САО РАН.

- Исследование переменных звезд, являющихся компонентами визуально-двойных систем, с применением метода сканирования изображений на одноканальном электрофотометре телескопа АЗТ-3 Коуровской обсерватории (ADS 9537 — BV Dra, BW Dra; ADS 2984 — SZ Cam; ADS 11061; ADS 8347 — DN UMa; ADS 8024 — AM Leo).
- Спектральное исследование SZ Cam по наблюдениям на телескопах Цейсс-1000 и 6-м БТА САО РАН.
- Фотометрические наблюдения затменно-переменных звезд на телескопе АЗТ-3 с ПЗС-приемником: долговременное исследование AM Leo и UU Cas, открытие и исследование новой затменной переменной звезды с полным затмением 3UC 281-203711.
- Спектральное исследование CC Cas, впервые выполненное с применением ПЗС-приемника, на оптоволоконном эшелле-спектрометре 1.2-м телескопа Коуровской обсерватории УрФУ.

ВЕРОЯТНОСТЬ ОТКРЫТИЯ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД КАК ЗАТМЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Тесные двойные звезды (ТДЗ) могут наблюдаться как спектрально-двойные и затменные переменные. Они дают нам наиболее полную информацию о таких характеристиках звезд, как массы, радиусы, светимости и т. д. Наблюдаемые распределения затменных переменных звезд по перечисленным выше характеристикам сильно искажены эффектами наблюдательной селекции. Оценка вероятности открытия ТДЗ как затменных переменных и учет эффектов наблюдательной селекции является важной задачей при статистических исследованиях двойных звезд.

В работах М. А. Свечникова с Т. А. Тайдаковой и О. В. Еретновой [1, 2] впервые определена полная вероятность открытия ТДЗ различных типов как затменных переменных при фотографических наблюдениях. Рассматривался случай равномерно ярких дисков звезд. Полная вероятность W была представлена как произведение геометрической и фотометрической вероятностей: $W = W_g \cdot W_f$. W_g — вероятность того, что плоскость орбиты ТДЗ будет ориентирована по отношению к наблюдателю таким образом, чтобы имели место затмения с глубиной большей, чем порог обнаружения Δm_{\min} . Она зависит от геометрических размеров орбиты системы и физических характеристик звезд-компонент. W_f — вероятность обнаружения переменности блеска затменной звезды с глубиной главного минимума $\geq \Delta m_{\min}$ при сравнении одной пары фотографических пластинок. Данная вероятность зависит от формы кривой блеска, амплитуд обоих минимумов, звездной величины системы. В нее входят также различные субъективные факторы: внимательность наблюдателя и др.

В наших работах кривые блеска задавались аналитически с помощью формул из [3]. Субъективные факторы учитывались согласно Плауту [4]. Полные вероятности вычислялись в зависимости от массы главной компоненты M_1 , отношения масс q , большой полуоси орбиты A и угла наклона орбиты i . В докладе приводятся графики зависимости вероятностей открытия ТДЗ различных типов от данных параметров.

В [5, 6] исследовалось влияние потемнения диска звезды к краю на величину вероятностей открытия ТДЗ как затменных переменных. Различие между случаями равномерно ярких дисков звезд и полным потемнением диска звезды к краю оказалось невелико.

Зная вероятности открытия, можно оценить пространственную плотность ТДЗ различных типов в окрестностях Солнца, что представляет интерес для теоретических исследований ТДЗ.

Библиографические ссылки

1. *Свечников М. А., Еретнова О. В., Ольнева М. Н., Тайдакова Т. А.* Учет эффектов наблюдательной селекции и распределение тесных двойных систем типов РГП и ПР в пространстве // Научные информации Астрономического совета АН СССР. — Вып. 67. — 1989. — С. 15—40.
2. *Еретнова О. В., Свечников М. А.* Оценка вероятности открытия контактных тесных двойных звезд как затменных переменных // Астрономо-геодез. исслед. : Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 1995. — С. 115—125.
3. Затменные переменные звезды, Ред. В. П. Цесевич. — М. : Наука, 1971. — С. 352.
4. *Курочкин Н. Е.* Открытия переменных звезд. — М. : Наука, 1971. — С. 11—48.
5. *Еретнова О. В., Свечников М. А., Эбель М. А.* Влияние закона потемнения диска звезды к краю на вероятность открытия разделенных тесных двойных звезд как затменных переменных // Астрофизика. — 2006. — Т. 49. — С. 151—169.
6. *Еретнова О. В., Свечников М. А., Эбель М. А.* Оценка вероятности открытия контактных ТДЗ в случае полного потемнения диска звезды к краю // Астрофизика. — 2008. — Т. 51. — С. 285—294.

ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Активность солнечного типа наблюдается на многих звездах поздних спектральных классов с внешними конвективными оболочками. Вращение звезды совместно с конвективными движениями вырабатывает сильные магнитные поля, которые вызывают множество проявлений активности — фотосферные пятна, хромосферные факелы, корональные петли, вспышки, излучение в ультрафиолетовом, рентгеновском и радиодиапазоне. Звездные пятна образуются в местах выхода магнитного поля и, таким образом, служат наблюдаемыми индикаторами недостаточно изученного звездного динамомеханизма, позволяют получить представление о структуре магнитного поля звезды. В докладе рассматривается современное состояние проблемы пятенной активности, описываются методы наблюдений, диагностики и анализа звездных пятен [1]. Также приводится обзор основных свойств звездных пятен, рассматриваются температуры пятен, площади, времена жизни, величины магнитного поля, особенности распределения пятен по широте и долготе звезды в зависимости от типа переменности двойной системы: BY Dra, RS CVn или WU UMa [2]. Эволюция звездных пятен на различных временных масштабах позволяет исследовать дифференциальное вращение и циклы активности звезд [3]. Эти данные совместно с информацией о параметрах запятненности накладывают важные ограничения на теоретические модели звездных магнитных полей.

Библиографические ссылки

1. *Berdyugina S. V.* Starspots: A Key to the Stellar Dynamo // *Living Rev. in Sol. Phys.* — 2005. — Vol. 2. — P. 1—62.
2. *Alekseev I. Y.* Starspot activity in late stars: Methods and results // *Astrophys.* — 2006. — Vol. 49. — P. 259—279.
3. *Katsova M. M., Livshits M. A., Soon W. et al.* Differential rotation of some HK-Project stars and the butterfly diagrams // *New Astron.* — 2010. — Vol. 15. — P. 274—281.

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В КАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗДАХ ТИПА WZ SGE: МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проведено численное моделирование структуры течения в катаклизмической переменной звезде V455 And, которая является характерным представителем подкласса систем типа WZ Sge. Анализ результатов численного моделирования позволил установить, что в системе формируется существенно эллиптический аккреционный диск, в котором, в свою очередь, присутствует область повышенной плотности вещества. В результате ретроградной прецессии диска, вызываемой приливным воздействием вторичного компонента двойной системы, плотная область перемещается по диску в направлении, обратном движению вещества и соответственно орбитальному движению системы.

На основе результатов анализа структуры течения предложена модель формирования двугорбой структуры кривой блеска системы V455 And, которая в дальнейшем может быть распространена и на других представителей этого класса систем, имеющих аналогичные наблюдательные проявления. Согласно предложенной модели область повышенной плотности вещества, перемещаясь в процессе своего прецессионного ретроградного движения, дважды за орбитальный период попадает в места расположения таких ударных волн, как рукава приливной ударной волны; «горячая линия» — волна, возникающая в результате взаимодействия околodискового гало (или в данном случае диска) со струей вещества из внутренней точки Лагранжа; отошедшая ударная волна. Попадая в места расположения этих волн, которые, вообще говоря, сосредоточены в две группы и внутри групп практически накладываются друг на друга, плотная область может их усиливать. Усиление этих волн может приводить к дополнительному отводу углового момента вещества, о чем свидетельствует периодическая структура зависимости темпа аккреции от времени, и к повышенному энерговыделению на самих волнах.

Предложенная модель позволяет объяснить не только возникновение самих горбов, но и перемещение их по фазе двойной системы, чего раньше объяснить не удавалось. Сдвиг горбов происходит вследствие того, что плотная область перемещается со скоростью прецессии, отличной от угловой скорости орбитального вращения системы, а следовательно, попадает в места расположения соответствующих ударных волн на каждом последующем обороте с некоторым опозданием (скорость прецессии на несколько процентов меньше скорости вращения системы).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-31031-мол_а.

СТАТИСТИКА КРАТНЫХ ЗВЕЗД И СЦЕНАРИИ ИХ ЭВОЛЮЦИИ

В работе Токовина [1] было рассмотрено несколько процессов, участвующих в формировании кратных звезд:

- фрагментация газопылевых облаков;
- аккреция окружающего вещества на протозвезды;
- гравитационное взаимодействие в рамках задачи N тел;
- миграция орбит.

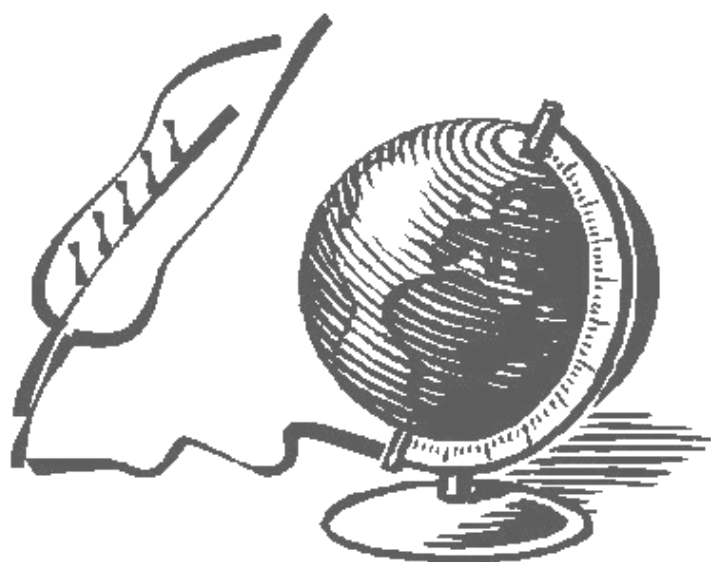
Фрагментация, по-видимому, является доминирующим процессом в формировании кратных протозвезд из турбулентной межзвездной газопылевой среды. Аккреция окружающего газа на сформировавшиеся звезды и подсистемы начинает активно проявлять себя на более поздних стадиях эволюции кратных звезд. В результате аккреции могут формироваться двойные подсистемы с очень сходными по физическим характеристикам компонентами — «близнецами». В результате динамической эволюции малых групп и скоплений звезд из них выбрасываются одиночные звезды и двойные подсистемы. Миграция приводит к сокращению периода внутренних двойных и увеличению иерархии кратной системы. Статистический анализ выборок кратных звезд позволяет судить о роли различных механизмов в эволюции кратных звезд.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-00185-а.

Библиографические ссылки

1. *Tokovinin A. A.* Comparative statistics and origin of triple and quadruple stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 389. — P. 925—938.

Из истории науки



УРАЛЬСКИЙ ПЕРИОД В ЖИЗНИ И ТВОРЧЕСТВЕ А. А. ЯКОВКИНА

21 мая 2012 г. исполнилось 125 лет со дня рождения выдающегося ученого и организатора астрономической науки, заведующего кафедрой астрономии (1937—1945), декана физико-математического факультета (1939—1942) Уральского государственного университета Авенира Александровича Яковкина (1887—1974). Авенир Александрович родился в поселке Благовещенский Завод бывшей Уфимской губернии 21 мая 1887 г. В 1920 г. окончил Казанский университет, работал в Обсерватории им. В. П. Энгельгардта, одновременно преподавал в Казанском университете (с 1926 г. — профессор, с 1927 г. — директор обсерватории) [1]. В годы Великой Отечественной войны астрономическая наука разделила вместе со всей страной невосполнимые потери в технике и людях, — большинство обсерваторий на захваченных фашистами территориях были полностью разрушены, погибли на фронтах войны или умерли от голода ученые-астрономы, талантливые специалисты, аспиранты и студенты. Астрономические учреждения, учебные заведения и научные центры срочно эвакуировались вглубь страны. В Свердловск уже в октябре 1941 г. стали прибывать астрономы, студенты из Москвы, Ленинграда и Киева. Сразу после начала войны перед Государственным астрономическим институтом им. П. К. Штернберга (ГАИШ) при МГУ встала задача организации в Свердловске Службы времени, которой заведовал молодой астрометрист Митрофан Степанович Зверев. Через месяц после эвакуации, 7 ноября, сигналы точного времени пошли в эфир из нашего города.

Свердловск в военные годы был закрытым городом. Деятельность ГАИШа была засекречена, поэтому сотрудники института не выходили на общение и совместную работу с кафедрой астрономии университета. Лишь в 1943 г. удалось организовать практику нескольких студентов университета в Службе времени, среди них были ныне здравствующая З. Н. Шукстова, В. П. Коноплева, А. К. Осипов и др. [2]. В 1944 г. москвичи покинули Свердловск, вернулись в свой город, но все с особой теплотой вспоминали два с половиной

года, проведенных на Урале. Всем было тяжело. Стояли холодные зимы, не хватало теплой одежды и обуви, было голодно, жили в тесноте, лишённые элементарных удобств, в сердцах постоянно была тревога за близких в Москве и на фронте, но общая работа для Победы всех объединяла, доброжелательность, забота, внимание коллег-свердловчан скрашивали их жизнь.

В те годы заведующим кафедрой был Авенир Александрович Яковкин. С семьёй Яковкина завязались дружеские отношения у профессора Киевского университета С. К. Всехсвятского. Он был частым гостем у Яковкиных в квартире по улице Малышева, где обсуждали не только астрономические проблемы, но и сводки с фронта с верой в скорую победу над фашистами. Позднее Сергей Константинович явился инициатором переезда Авенира Александровича в 1945 г. для работы в Киевском университете. За ним уехал в Киев аспирант А. К. Осипов.

До А. А. Яковкина в 1934—1937 г. кафедру астрономии в Уральском университете возглавлял С. В. Муратов (1881—1949). Эту должность он ещё раз займет в 1945—1949 гг. Муратов был родом из дворянской семьи. Родился в Петербурге, окончил Петербургский горный институт в 1906 г., а в 1930 г. — Ленинградский институт точной механики и оптики, руководил учебной астрономической обсерваторией в институте им. Лесгафта. В 1931 г. был выслан на Урал по делу Русского общества любителей мироведения (РОЛМ). В 1931 г. преподавал физику и математику в техникумах г. Кудымкара Коми-Пермяцкого округа. В 1932 г. Муратов переехал в Свердловск, где мечтал построить такую же учебную обсерваторию на Урале, что и в Петербурге. Сергей Владимирович был руководителем лучшего в университете студенческого кружка и стал первым астрономом Свердловска. Однако кто-то выяснил, что С. В. Муратов по образованию горный инженер, не имеет кандидатского звания, а значит, не имеет права возглавлять кафедру астрономии. Для руководства кафедрой был приглашен из Казани профессор, астроном-теоретик, видный специалист в области изучения фигуры Луны — Авенир Александрович Яковкин [3]. По воспоминаниям К. А. Бархатовой и З. Н. Шукстовой, Яковкин был типичный профессор-интеллигент. Седовласый, статный, высокий, доброжелательный, отзывчивый, он производил неотразимое впечатление на всех, кто с ним общался.

В годы войны А. А. Яковкин не только заведовал кафедрой астрономии, но и вел большую педагогическую и организационную работу, занимался разработкой автоматических навигационных приборов для авиации. Эта работа была отмечена позднее: А. А. Яковкин был награжден орденом Трудового Красного Знамени (1944). На кафедре Авенир Александрович читал курсы по сферической, практической, теоретической астрономии, небесной механике, высшей геодезии и другим предметам, наблюдал со студентами покрытия звезд Луной.

Война закончилась, эвакуированные в Свердловск астрономы стали возвращаться домой. С. К. Всехсвятский уговорил А. А. Яковкина уехать в Киев. С 1945 г. Яковкин работал в Киевском университете, с 1949 по 1951 г. был деканом физического факультета. С 1952 по 1959 г. — директор, а с 1959 по 1968 г. — научный консультант Главной астрономической обсерватории АН УССР, член-корреспондент АН УССР с 1951 г.

Основные научные работы А. А. Яковкина связаны с изучением вращения Луны и ее фигуры. Им была открыта и исследована асимметрия видимого диска Луны и зависимость ее от оптической либрации («эффект Яковкина»). А. А. Яковкин предложил, а в дальнейшем применил новый метод позиционных углов с целью изучения либрации Луны. Им сконструированы многочисленные астрономические приборы и приспособления: оригинальный целостат, горизонтальный лунный телескоп, кассета для фотографирования Луны, прибор для наблюдений покрытий звезд Луной и др. С 1935 г. А. А. Яковкин являлся членом постоянной комиссии по изучению Луны Международного астрономического союза, организатором и председателем подкомиссии по изучению движения и фигуры Луны Всесоюзной астрометрической комиссии (1937—1961).

В связи со 125-летием со дня рождения А. А. Яковкина коллеги, сотрудники ГАО НАН Украины организовали в мае 2012 г. семинар «Современное состояние исследования Луны», посвященный юбилейной дате, и приурочили его к открытию памятной мемориальной доски. В свою очередь, преподаватели и студенты кафедры астрономии и геодезии, сотрудники Астрономической обсерватории им. К. А. Бархатовой Уральского федерального университета отправили на имя директора ГАО НАН Украины академика НАН Украины Я. С. Яцкива и руководителя семинара профессора В. С. Кислюка приветственный адрес. Вот его текст:

«Дорогие коллеги!

Уважаемые сотрудники Главной астрономической обсерватории НАН Украины!

Коллектив преподавателей и студентов кафедры астрономии и геодезии Уральского федерального университета, сотрудники Астрономической обсерватории им. К. А. Бархатовой сердечно приветствуют участников научного семинара, посвященного 125-й годовщине со дня рождения Авенира Александровича Яковкина, член-корреспондента АН Украины, доктора физико-математических наук, профессора, директора Главной астрономической обсерватории АН УССР с 1952 по 1959 год, прекрасного организатора науки, замечательного ученого, педагога и человека! Авенир Александрович оставил огромный след в истории уральской астрономии. С 1937 по 1945 год Авенир Александрович заведовал кафедрой астрономии Уральского университета, с 1939 по 1943 год был деканом физико-математического факультета.

В суровые годы Великой Отечественной войны Свердловск принял многих известных ныне астрономов. Авенир Александрович Яковкин, преподаватели кафедры астрономии работали в тесном контакте с сотрудниками ГАИШа, Киевского университета, поддерживали их в трудные минуты жизни.

В уральский период деятельности А. А. Яковкин создал ряд оригинальных приборов, в том числе для предвычисления покрытий звезд Луной для многих городов Советского Союза. В этой работе в качестве наблюдателя ему помогал Александр Кузьмич Осипов — студент кафедры в те годы.

В годы войны А. А. Яковкин сконструировал для авиации специальный астрономический секстант, а также вел работы, связанные с вопросами навигации и обороны страны. За личный вклад в Победу над фашизмом он был награжден двумя медалями "За доблестный труд в Великой Отечественной войне (1941—1945)" (1945, 1946).

В период войны под руководством А. А. Яковкина сделала свои первые шаги в науке выпускница кафедры 1942 года. Валентина Петровна Коноплева, окончившая аспирантуру в 1948 году, ставшая позднее ведущим специалистом по физике комет в ГАО НАН Украины.

По воспоминаниям К. А. Бархатовой, которая в 1960 году после А. А. Яковкина восстановила кафедру астрономии и геодезии в Уральском университете, и З. Н. Шукстовой, ныне здравствующей, которой пошел 92-й год, Авениру Александровичу были присущи мягкость, деликатность, доступность,

соответствующая настоящему ученому-интеллекту. Это был "тонкий специалист по труднейшим вопросам движения и теории Луны, знаток проблем теоретической астрономии, талантливый новатор и конструктор". Такую характеристику дали С. Н. Блажко и С. В. Орлов, и она в полной мере отражает научную и педагогическую деятельность А. А. Яковкина в Свердловске. Уральские астрономы будут всегда благодарны Авениру Александровичу Яковкину за огромный вклад в развитие астрономии в нашем университете. Преподаватели знакомят новое поколение студентов с традициями кафедры, с ее основателями и всегда среди первых с неизменным уважением называют имя Авенира Александровича.

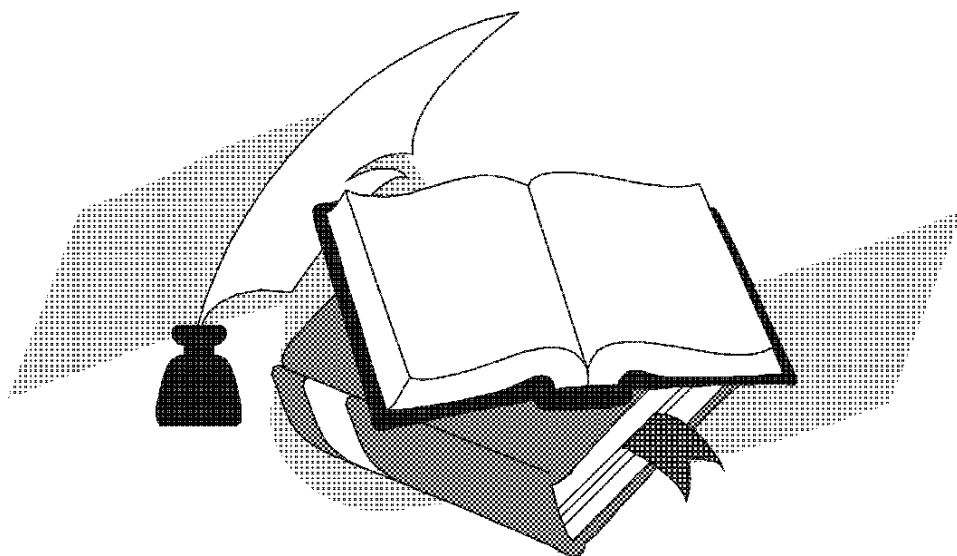
Мы признательны вам за прекрасную традицию отмечать юбилейные даты сотрудников обсерватории, которые внесли большой вклад на поприще науки, в достижения обсерватории.

Желаем участникам юбилейного заседания новых научных открытий, удачи, здоровья и счастья!»

Библиографические ссылки

1. 50 років Головні астрономічні обсерваторії. — Київ, 1994. — Р. 30—35.
2. *Левитская Т. И.* Астрономия на Урале в годы Великой Отечественной войны // Война и российское общество: 1914—1945 годы : Материалы Пятых урал. военно-ист. чтений, Екатеринбург, 22—23 сент. 2005 г., Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2005. — С. 116—119.
3. *Давыдов И. К. А. Бархатова.* Наши земляки. — Свердловск : Свердл. кн. изд-во, 1985. — С. 7—14.

Литературные страницы



Н. Д. Калинина

АСТРОСОВЕТУ — 75!

Тянет знать, что там, в мире огромном,
От Земли до вселенских глубин.

Б. М. Шустов

О, старший брат!

Взаимны обретения:

Уж век (без четверти) Ты — всем координатор,
Стратег развития!

Урал же — подкрепление,
Младых научных сил куратор!

Что нас роднит?

Безумство устремлений

В ловушки разума и Космоса глубины?

Иль непереносимость восхищения

Музыкой сфер небесных?

Иль рутина?

«Мы рождены, чтоб сказку сделать былью»,
Завесы тайн срывая вновь и вновь!

У ИНАСАНа есть размах и крылья
Познания Вселенной и любовь!

20 декабря 2011

О времена! О устремления! О нравы!
Век девятнадцатый настойчиво призвал:
Без астрономии в Казани, Боже правый,
Жить некорректно всем! И КАФЕДРУ создал!

Энтузиастов и мыслителей немало
За годы выросло и подвизалось там.
Полвека свою жизнь Казань сверяла
По кафедральным солнечным часам.

И кафедра царит уж два столетья:
Подвижников трудами возвышаясь,
И наблюдая даже в лихолетья,
И в ближний Космос расширяясь!

«Дубяго», «Крат», «Мартынов», «Лобачевский»,
«Краснов», «Литтров» — да всех не перечесть! —
Творят орбитами космические фрески
Во славу КАФЕДРЫ, что днесь в Казани ЕСТЬ!

Июль 2010

Т. В. Бордовицкой на 70-летие

Не считает годы — считает орбиты!
С мусором космическим натворила дел.
Математика и жизнь воедино слиты
В эволюции студентов и малых тел.

В системе Солнечной все так динамично —
Моделирование численное высокоточно.
Орбиты Урала сплелись поэтично
С орбитами Томска. Прочно!

Земляне!

О, кто мы, по меркам Вселенной?
Песчинки, пылинки во мраке миров?
Смеемся и плачем по воле Вселенной,
И тщимся пробиться сквозь бремя оков.

Наш век незавиден по меркам Вселенной —
Лишь проблеск удачи, лишь проба пера.
Рожден в Порт-Артуре по воле Вселенной
И в астромгновенье — ДИРЕКТОР!
(Ура!)

И только землянам по воле Вселенной
Присущи порядочность, долг и любовь.
Что, безусловно, по меркам Вселенной
ВЕЛИКО,

БЕЗМЕРНО
ВО ВЕКИ ВЕКОВ!

23 октября 2011

Над зданием УрГУ нависла туча:
Чернеет, пухнет, пыжится, растет,
И тьма ее по градиенту круче,
Круче, безумнее —
полнеба достает!

Уж Солнце бедное сокрылось где-то —
Не шлет Земле живительных лучей.
Мир сгорбился, притих без света
Науки, и это нам — всего горчей...

22 марта 2009

Простая жизнь, прямая жизнь и ясная,
В развитии и цельности ПРЕКРАСНАЯ!

Не-ЛТР проблемы излучения Вас волновали,
Всех звездных атмосфер строение Вы изучали.

Святых традиций кафедры хранитель,
Вы для студентов истинный Пракситель.

Создатель школы астрофизики Казанской,
Вы — ЗВЕЗДНЫЙ АКСАКАЛ «на googolplex Янских»!

Простая жизнь, прямая жизнь и ясная,
В развитии и цельности ПРЕКРАСНАЯ!

2010

P. S.

Googolplex — число, равное десяти в степени googol.

Googol (гугол) — в десятичной системе счисления изображается единицей со 100 нулями. Число гугол больше числа всех частиц в известной нам части Вселенной, которое составляет величину от 1079 до 1081. Таким образом, число гуголплекс, состоящее из (гугол+1) цифр, в классическом «десятичном» виде записать невозможно, даже если всю материю в известной части Вселенной превратить в бумагу и чернила или в компьютерное дисковое пространство.

Янский (Ян, Jy) — внесистемная единица измерения спектральной плотности потока излучения.

*Ли́ке — соратнице по практике
в Астрофизическом институте Алма-Аты в 1976 г.*

*Ах, как долго-долго едем...
Н. Матвеева*

В чаше бархатной мирозданья
Звезды гроздьями с неба висли.
Два почти небесных созданья
Окунались в глубины мысли.

Астрономия философична
По природе происхожденья,
Эклектична и поэтична —
Как любимое Божье творенье.

Горы, станция на плато —
Волшебство... помнишь, Лика, это?
Мы на нарах в кибитке, зато —
Песни дивные до рассвета.

А под небом такой мандраж! —
Восхищение до смятенья,
Воспарение духа!.. аж
До «безвинного» опьянения...

Сентябрь 2009

Играя жизнь в спектакле «Моно»,
Как перед зеркалом, пред вечностью один,
Как честный Ной во время оно,
Спасаясь преданных тебе,

но ты один...

Ты гол и одинок во всей Вселенной! —
И управляешь дерзостно энергией светил,
И пьешь чай совсем обыкновенно...
А знаешь ли, КАК дорог всем и мил?!!

02 июня 2009

Стаи спутников пролетают
Над упрямой его головой.
Дима камерой управляет —
Не прельщает его покой.

Он упорно чего-то строит:
Яму, баню, теплицу, душ.
Вот сейчас СБГ настроит —
И держитесь, спутники, уж!

Теоретикам-физикам горько:
Плачут «классики» и «кванты» —
Не сольются в экстазе. Только
Им без Димы вообще кранты.

Кочегары все ходят строем —
Хоть Васильич порою крут,
Но всегда справедлив! Откроем
Главный в жизни его редут:

Он родился — степной ветер.
А в мечтах он — морская соль.
И живет он — за ВСЕ в ответе!
Вот такая ЗВЕЗДНАЯ роль!..

Февраль 2008

Я давно уже Вам не пишу
Писем грустных о жизни усталой,
Шалой вестью весну не бужу
И не жалуюсь — сколько осталось.

А осталось — поглубже вздохнуть,
Отрешиться и взмыть в поднебесье...
Впрочем, я Вам хочу намекнуть,
Что люблю...

Это — главная песня.

31 марта 2009

Жизнь, как ты скоротечна!..
Уходят все, кто создал нас.

Как безобразно слово «вечность» —
Уж не отложишь про запас,
Назавтра, дальше на полгода
Ни семинар, ни randevu.

Уходят, кто вершил погоду...
А мы, а вы, а я живу...

Приходит ночь. Какая Млечность! —
Успеть впитать и не забыть!
Я примирюсь со словом «вечность»,
Чтоб помнить ВЕЧНО и любить!

07 мая 2008

За окном листопад
Каждый год в это время шумит.
Сердца стук невтопад
Неуклонное время дробит.

Лишь вчера звездопад
Ликом вечности нас ослепил.
И опять наугад
Я бреду —
листопад закружил...

10 октября 2008

Объятая любовью шквальной,
Среди затмения светил
Кружится Маша в вальсе бальном,
И сердце бьется эпохально!..

Душа ж — в Коуровке опальной,
Где всякий Машу возлюбил —
И взгляд отточенно ментальный,
И кроткий нрав провинциальный,

И сонм вопросов шедевральный,
Что АСТРОмэтров покори!!!

11 октября 2008

Смысл бытия из формул выводить,
Бездонность неба честно познавая,
Из мальчиков философов растить,
И девочку с косичкой вышивая.

На босу ногу в зиму — покурить,
И с Барселоной нежно обниматься,
И просто, как дышать, любить...
Ну, и на роликах кататься!

Спектры Бытия

Времена не выбирают,
В них живут и умирают...

А. Кушнер

Не мы, но Время выбирает нас
Объектами слепых экспериментов.
Мы для него — набор инертных масс,
Химические смеси элементов.

Для Времени все даты — хороши,
Нет у него ни радости, ни боли,
Ни страсти, ни страданий, ни души,
Ни малой, как у нас, — свободы воли...

Мы для него — исходный материал,
Идущий на потоке в обработку...
Никто из нас маршрут не выбирал,
Сядясь покорно в поданную лодку.

... Течет сквозь вечность Времени река,
Не зная ни порогов, ни затонов,
Темна, невозмутима, глубока —
Ристалище физических законов...

Смириться ль с равнодушием времён? —
Как этим Гамлет мучился шекспиров!
А сколько неизвестных нам имён
Себя такой же мукой наградило?!

И находили!.. Как бы тяжелы
И беспощадны ни были вериги,
Бессильны даже Зевсовы орлы
Прервать до срока ниточку интриги

Любви и Жизни...

14 июня 2012

Юная Звезда

Не забывай рассветную звезду,
Истаявшую в золоте так рано.
Не уверяй: я вслед за ней иду!.. —
Извилист путь средь мрака и тумана.

Хотя бы помни, что она была,
С ее наивно светлыми лучами...
Глухая тьма клубится за плечами,
Дорога впереди — еще бела!

Не забывай про Юную Звезду,
Пусть не по ней проложены маршруты,
Она с тобой, в тебе, не на виду...
Пред ней другие звезды — лилипуты!

... Не вырожденные карлики, о нет, —
Нормально излучающие звёзды...
Но их далекий, отчужденный свет
Приходит к нам не вовремя иль поздно.

И ничего в судьбе не изменив,
Питая скудно пиксельные гнезда,
Они один безрадостный мотив
Внушают нам по-менторски серьезно:

Вселенная, рожденная в огне,
Взорвавшись, расширяется от века...
Она — слепа, направлена вовне,
Летит, не замечает Человека!..

Ни разума его и ни души,
Терзаний страсти и дерзаний мысли...
Наш слабый крик рассеется в глуши,
Рассыпавшись на знаки, буквы, числа.

Истаяла рассветная Звезда...
Но память сердца странно суеверна:
Пока ты жив, Звезда с тобой всегда, —
Светла, неугасима и нетленна!

13 ноября 2012

«Конца Света не будет!»

Песенка из КВН-2012

Кто-то Веру утратит,
Кто-то — Славу добудет,
Не волнуйся, касатик,
Конца Света — не будет!

Кто-то вспыхнет вполсилы,
Кто-то Пламя раздует,
Не печалуйся, милый,
Конца Света — не будет!

То ли клик журавлиный,
То ли плач нас разбудит,
Не тревожься, любимый,
Конца Света — не будет!

Если встретились двое,
Значит, третий прибудет.
В этом — Счастье земное,
Конца Света — не будет!

01 февраля 2012

Я. И. Хусанова

Наука как еда

Мечта студента каждого — счастливые билеты
И каждый день на утро — горячие котлеты.
Но утром просыпаешься, а холодильник пуст,
И на плите ничто не жарится — желудок снова пуст.
Приходишь на экзамен и смотришь в свой билет,
А там на три вопроса не знаешь ты ответ.
И грустно так становится, что делать-то теперь?
А горе-однокурсник кричит: «Мое проверь!»
В борьбе против незнания остался ты один,
Грызешь гранит науки, а он непобедим.
Но в этом-то вся прелесть — науке нет конца,
В то время как котлеты кончаются всегда!

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Deguchi Shuji	NRO	deguchishuji60@gmail.com
Henkel Christian	MPiFR	p220hen@mpifr-bonn.mpg.de
Montgomery Michele M.	UCF	montgomery@physics.ucf.edu
Nakashima Jun-ichi	NKU	junichi@hku.hk
Аввакумова Екатерина Анатольевна	УрФУ	Ekaterina.Avvakumova@usu.ru
Акинщиков Алексей Николаевич	ГАИШ МГУ	aan93@mail.ru
Алакоз Алексей Валерьевич	АКЦ ФИАН	rett@asc.rssi.ru
Алексеева Софья Александровна	ИНАСАН	sophy22@yandex.ru
Антипин Сергей Витальевич	ГАИШ МГУ	antipin@sai.msu.ru
Антохин Игорь Иванович	ГАИШ МГУ	igor@sai.msu.ru
Антохина Элеонора Артуровна	ГАИШ МГУ	elant@sai.msu.ru
Артамонова Анна Владимировна	УрФУ	mostcosmos@gmail.com
Балуев Роман Владимирович	ГАО РАН	roman@astro.spbu.ru
Бахтигараев Наиль Сагитович	ИНАСАН	nail@inasan.ru
Белей Дмитрий Андреевич	ТГУ	dmitry.beley@gmail.com
Бисикало Дмитрий Валерьевич	ИНАСАН	bisikalo@inasan.ru
Бисярина Анастасия Павловна	УрФУ	bisyarina_nastya@mail.ru
Бобкова Вера Ивановна	УрФУ	vera_bobkova2201@mail.ru
Бондарев Роман Викторович	ЮФУ	rom-bond@mail.ru
Бурданов Артем Юрьевич	УрФУ	artem.bourdanov@gmail.com
Буренин Родион Анатольевич	ИКИ РАН	rodion@iki.rssi.ru
Быков Олег Павлович	ГАО РАН	oleg@OB3876.spb.edu

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Вавилов Дмитрий Евгеньевич	СПбГУ	dj_vil@bk.ru
Васько Даниил Александрович	СибГАУ	danivasco@mail.ru
Вибе Дмитрий Зигфридович	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Вильянен Валентина Валентиновна	СибГАУ	Vilyanen_valya@mail.ru
Волков Константин Валерьевич	УрФУ	KVVolkov@rambler.ru
Галушина Татьяна Юрьевна	ТГУ	volna@sibmail.com
Гашев Артем Владимирович	УрФУ	solibrwar@mail.ru
Гламазда Дмитрий Васильевич	АО УрФУ	antimuon@yandex.ru
Горда Станислав Юрьевич	АО УрФУ	Stanislav.Gorda@usu.ru
Горнаков Кирилл Олегович	СибГАУ	kiraxy@mail.ru
Горнов Дмитрий Евгеньевич	УрФУ	CheshireCorvus@mail.ru
Давыдова Ольга Анатольевна	АО УрФУ	Stanislav.Gorda@usu.ru
Данилов Владимир Михайлович	АО УрФУ	vladimir.danilov@usu.ru
Дёмин Антон Сергеевич	ЧелГУ	tonytreeboa@gmail.com
Дорогов Алексей Александрович	УрФУ	dorogov.alexey@gmail.com
Дремов Владимир Владимирович	РФЯЦ-ВНИИТФ	vvd0531@mail.ru
Дремова Галина Николаевна	РФЯЦ-ВНИИТФ	G.N.Dryomova@mail.ru
Дудоров Александр Егорович	ЧелГУ	dudorov@csu.ru
Еретнова Ольга Викторовна	ЧелГУ	eretnova@csu.ru
Ермаш Андрей Александрович	АКЦ ФИАН	aermash@gmail.com
Есинов Валентин Федорович	ГАИШ МГУ	gmr@sai.msu.ru
Жилкин Андрей Георгиевич	ИНАСАН	zhilkin@inasan.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Жучков Роман Яковлевич	КФУ	gilgalen@yandex.ru
Заложных Иван Сергеевич	УрФУ	ivan.zalozhnih@gmail.com
Захарова Полина Евгеньевна	АО УрФУ	polina.zakharova@usu.ru
Зинченко Игорь Иванович	ИПФ РАН	zin@appl.sci-nnov.ru
Зубарев Сергей Николаевич	УрФУ	Sergey.cl@gmail.com
Зуев Дмитрий Михайлович	СибГАУ	ZuevDmitriy93@yandex.ru
Ионов Дмитрий Эрикович	ИНАСАН	ionovd@inasan.ru
Ихсанов Назар Робертович	ГАО РАН	nazar.r.ikhсанov@gmail.com
Кабанов Артем Анатольевич	ИНАСАН	artkabanov@inasan.ru
Казанцев Максим Борисович	ЧелГУ	kazant@pochta.ru
Кайгородов Павел Вячеславович	ИНАСАН	pasha@inasan.ru
Калинин Александр Александрович	АО УрФУ	kaaargu@rambler.ru
Калинина Наталия Дмитриевна	АО УрФУ	n_lob@rambler.ru
Квашнина Альвира Васильевна	УрФУ	ro120.04@mail.ru
Кирсанова Мария Сергеевна	ИНАСАН	kirsanova@inasan.ru
Клиничев Арсений Дмитриевич	ГАИШ МГУ	arsenklinichev@gmail.com
Ковалева Дана Александровна	ИНАСАН	dana@inasan.ru
Кожевников Валерий Петрович	АО УрФУ	Valerij.Kozhevnikov@usu.ru
Кожевникова Алла Валерьевна	АО УрФУ	kozhevnikova-a@yandex.ru
Колесов Дмитрий Николаевич	УрФУ	kolesovdn@gmail.com
Комберг Борис Валентинович	АКЦ ФИАН	bkomberg@asc.rssi.ru
Кононов Дмитрий Алексеевич	ИНАСАН	dkononov@inasan.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Константинов Александр Олегович	УрФУ	izecson82@yandex.ru
Корень Екатерина Сергеевна	УрФУ	modaeru@gmail.com
Коротнев Максим Олегович	УрФУ	maks.corotnev2011@yandex.ru
Кочеткова Мария Андреевна	ЧелГУ	maria-ko@yandex.ru
Кузнецов Эдуард Дмитриевич	АО УрФУ	eduard.kuznetsov@usu.ru
Кулешов Юрий Павлович	ОАО «Корпорация "Комета»	rykhlova@inasan.ru
Кучина Анастасия Дмитриевна	УрФУ	nastkuchina@yandex.ru
Лагутов Сергей Петрович	УрФУ	sereys121@yandex.ru
Ладейщиков Дмитрий Антонович	УрФУ	helioz@mail.ru
Левитская Татьяна Иосифовна	УрФУ	Tatyana.Levitskaya@usu.ru
Левкина Полина Анатольевна	ИНАСАН	ayvazovskaya2008@yandex.ru
Липунов Владимир Михайлович	МГУ	test@mail.ru
Логинова Мария Олеговна	УрФУ	lek@k96.ru
Лукашевич Дмитрий Евгеньевич	УрФУ	lukashevich92@mail.ru
Любимов Виктор Николаевич	ИНАСАН	lubimov@inasan.ru
Лямова Галина Викторовна	АО УрФУ	azu565@rambler.ru
Ляпцев Антон Павлович	УрФУ	anton.lyaptsev@gmail.com
Макаренко Николай Григорьевич	ГАО РАН	ng-makar@mail.ru
Малков Олег Юрьевич	ИНАСАН	malkov@inasan.ru
Мартюшев Леонид Михайлович	УрФУ	leonidmartyushev@gmail.com
Матвеева Екатерина Алексеевна	УрФУ	avelon@el.ru
Мезенцева Алина Дмитриевна	ТГУ	AlinaSunnyGirl@mail.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Мингалиев Марат Габдуллович	САО РАН	marat@sao.ru
Москвин Александр Сергеевич	УрФУ	Alexandr.Moskvin@usu.ru
Наньшев Дмитрий Шаримзянович	УрФУ	tatyana.nikiforova@usu.ru
Никифорова Татьяна Петровна	АО УрФУ	tatyana.nikiforova@usu.ru
Никоненко Владимир Олегович	СибГАУ	Strapinka@gmail.com
Овчинников Александр Игоревич	УрФУ	terbium159@gmail.com
Овчинников Александр Сергеевич	УрФУ	alexander.ovchinnikov@usu.ru
Орлов Виктор Владимирович	СПбГУ	vor@astro.spbu.ru
Островский Андрей Борисович	УрФУ	Andrei.Ostrovskii@usu.ru
Оськина Кристина Игоревна	СПбГУ	zegzithsa@gmail.com
Павлюченков Ярослав Николаевич	ИНАСАН	pavyar@inasan.ru
Парфёнов Сергей Юрьевич	УрФУ	grey1105@yandex.ru
Перминов Александр Сергеевич	УрФУ	perminov12@yandex.ru
Подъячева Татьяна Германовна	УрФУ	tainit1@rambler.ru
Полушина Татьяна Сергеевна	АО УрФУ	Tatyana.Polushina@usu.ru
Попков Александр Викторович	МГУ	alexububu@mail.ru
Попова Мария Эриковна	АО УрФУ	Maria.Popova@usu.ru
Пузин Василий Борисович	ИНАСАН	kotzvezd@yandex.ru
Пуланова Анна Фёдоровна	УрФУ	PunanovaAnna@gmail.com
Путков Станислав Игоревич	АО УрФУ	Putkov_S@mail.ru
Пшенка Иван Андреевич	УрФУ	forgotten302@gmail.com
Раздымакина Оксана Никитична	ТГУ	oksana.razdimahina@gmail.com

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Ромашин Георгий Сергеевич	АО УрФУ	Georgij.Romashin@usu.ru
Ронжина Анастасия Алексеевна	УрФУ	virgo797@gmail.com
Рудницкий Георгий Михайлович	ГАИШ МГУ	gmr@sai.msu.ru
Рыхлова Лидия Васильевна	ИНАСАН	rykhlova@inasan.ru
Салий Светлана Викторовна	АО УрФУ	Svetlana.Salii@usu.ru
Самбаров Георгий Евгеньевич	ТГУ	detovelli@vtomske.ru
Самусь Николай Николаевич	ИНАСАН	samus@sai.msu.ru
Светлакова Татьяна Николаевна	УрФУ	famasia@mail.ru
Селезнев Антон Федорович	АО УрФУ	Anton.Seleznev@usu.ru
Семенов Вадим Алексеевич	АКЦ ФИАН	vsemenov.mipt@gmail.com
Семеновых Николай Андреевич	УрФУ	ScorpDragon@bk.ru
Сербер Александр Волькович	ИПФ РАН	serber@appl.sci-nnov.ru
Сильченко Ольга Касьяновна	ГАИШ МГУ	olga@sai.msu.ru
Скрипниченко Павел Вадимович	УрФУ	savl-silverheart@rambler.ru
Смирнов Григорий Тимофеевич	ПРАО ФИАН	smirnov@prao.ru
Смирнова Ксения Ильдаровна	УрФУ	Arashu@rambler.ru
Соболев Андрей Михайлович	АО УрФУ	Andrej.Sobolev@usu.ru
Соловьев Александр Анатольевич	ГАО РАН	solov@gao.spb.ru
Суворова Дарья Сергеевна	МБОУ ДОД ДТДиМ	dasha.toporisheva@mail.ru
Судов Леонид Николаевич	СПбГУ	l_sudov@mail.ru
Сытов Алексей Юрьевич	ИНАСАН	sytov@inasan.ru
Татаринев Дмитрий Александрович	УрФУ	zero94.tatarina@yandex.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Трубецкой Артур Кириллович	УрФУ	fullgream@gmail.com
Трушин Дмитрий Иванович	ГАИШ МГУ	trushind@gmail.com
Тутуков Александр Васильевич	ИНАСАН	atutukov@inasan.ru
Тюшняков Алексей Андреевич	УрФУ	neorfy@gmail.com
Устинова Екатерина Андреевна	УрФУ	ustinowa.katya2013@yandex.ru
Устюгов Василий Александрович	ИНАСАН	vustyugov@inasan.ru
Фатеева Анна Михайловна	ИНАСАН	fateeva@inasan.ru
Фомин Евгений Николаевич	СибГАУ	aleksei.belomestnov@mail.ru
Фролова Анастасия Сергеевна	ИГУ	test@mail.ru
Хайбрахманов Сергей Александрович	ЧелГУ	khaibrakhmanov@csu.ru
Хачай Юрий Васильевич	ИГФ УрО РАН	yu-khachay@yandex.ru
Холшевников Константин Владиславович	СПбГУ	kvk@astro.spbu.ru
Хусанова Яна Игоревна	УрФУ	janjo@list.ru
Цивилев Александр Прокопьевич	ПРАО ФИАН	tsivilev@prao.ru
Чазов Вадим Викторович	ГАИШ МГУ	vadimchazov@yandex.ru
Чертулова Юлия Игоревна	УрФУ	thunderstorm666@mail.ru
Чесноков Егор Яковлевич	СибГАУ	egor.chesnokov.93@mail.ru
Чистякова Анастасия Павловна	УрФУ	an_chistyakova_1993@mail.ru
Шагабутдинов Альфат Исмагилович	АО УрФУ	shgb-alik@yandex.ru
Шагабутдинов Андрей Альфатович	УрФУ	Shgb-alik@yandex.ru
Шайдуллин Вахит Шамильевич	СПбГУ	shvak@yandex.ru
Шаповалова Анастасия Сергеевна	УрФУ	Djet15@mail.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Шематович Валерий Иванович	ИНАСАН	shematov@inasan.ru
Шумков Владислав Петрович	МБОУ ДТДиМ	vlad61shumkov@mail.ru
Шустов Борис Михайлович	ИНАСАН	bshustov@inasan.ru
Эбель Мария Александровна	ЧелГУ	ebelma@csu.ru
Элбакян Вардан Геворгович	ЮФУ	vardan.g.elbakyan@gmail.com
Янкелевич Виктория Александровна	ЮФУ	vik-yank@yandex.ru

Содержание

Материалы конференции	5
ОБЗОРНЫЕ ЛЕКЦИИ	7
Алакоз А. В. Наземно-космический интерферометр «Радио-Астрон»: текущее состояние и первые наблюдения мазеров .	7
Вибе Д. З. Марсианские метеориты .	9
Галушина Т. Ю., Раздымакина О. Н. К вопросу о хаотичности движения астероидов, сближающихся с Землей .	19
Зинченко И. И. 80 лет радиоастрономии. Что дальше? .	33
Орлов В. В., Жучков Р. Я. Динамика кратных звезд: новое и хорошо забытое старое .	42
Рыхлова Л. В. Космический мусор — парадокс XXI столетия .	54
Сильченко О. К. Формирование и эволюция дисковых галактик	76
Соловьев А. А. Теоретическая модель солнечного пятна: равновесие, устойчивость и долгопериодические собственные колебания .	90
Хачай Ю. В. Возможность МГД-процесса на стадии аккумуляции Земли .	93
Холшевников К. В., Быков О. П. Определение орбит: метод Лапласа и метод ПВД .	103
Чазов В. В. Модель вековых изменений элементов планетных орбит .	118
Шустов Б. М. Практические аспекты проблемы космических угроз: поиск опасных небесных тел .	131
ТЕЗИСЫ СТУДЕНЧЕСКИХ ДОКЛАДОВ	133
Белей Д. А. Развитие прикладной программной системы для визуализации вероятностной орбитальной эволюции астероидов .	133
Бисярина А. П., Соболев А. М., Горда С. Ю. Спектральное исследование звезды HD 200775 в фазе максимума активности .	134
Бондарев Р. В., Щекинов Ю. А. Перемешивание тяжелых элементов при столкновениях оболочек сверхновых .	135
Вавилов Д. Е. Новый метод определения орбит вновь открытых малых тел Солнечной системы .	136
Дёмин А. А. Реализация алгоритма Форчуна для диаграммы Вороного .	137
Квашнина А. В. Определение состояния облачного покрова по изображению ночного неба, полученному на allsky-камере .	138
Кочеткова М. А. Классификация молодых звезд по механизму аккреции .	139

Логинова М. О. Комплекс программ для автоматизированного получения и контроля качества калибровочных ПЗС-кадров телескопов сети МАСТЕР	140
Мезенцева А. Д., Авдюшев В. А. Метод наименьших модулей и его эффективность при обработке измерений с ошибками различного распределения	141
Оськина К. И. Влияние термодинамических эффектов на осевую раскрутку астероидов	142
Перминов А. С. Исследование областей резонансов низких порядков при различных значениях парусности ИСЗ	143
Ронжина А. А. Веб-приложение для контроля и управления спектрофотометрическим комплексом 1.2-метрового телескопа Коуровской астрономической обсерватории	144
Сабаров Г. Е. О выборе моделей движения малых тел и точности определения доверительных областей	145
Смирнова К. И. Исследование морфологии кандидатов в галактики с полярными кольцами	146
Трушин Д. И. Моделирование ансамбля широких двойных и определение функции звездообразования	147
Чулков Д. А. Статистические свойства ансамбля двойных звезд и их связь с начальными условиями звездообразования	148
Янкелевич В. А. Влияние динамики Магеллановых Облаков на переход проградных шаровых скоплений в ретроградные	149
ТЕЗИСЫ КРАТКИХ СООБЩЕНИЙ	151
Балуев Р. В. Роль красного шума лучевой скорости в программах поиска экзопланет: только три планеты в системе GJ 581?	151
Балуев Р. В. О поиске периодических компонент в наблюдательных данных	152
Горда С. Ю. ПЗС-спектрофотометрия CC Cas на оптоволоконном эшелле-спектрометре 1.2-м телескопа АО УрФУ	153
Данилов В. М., Путков С. И. Корреляции и неустойчивости колебаний фазовой плотности в моделях рассеянных звездных скоплений	154
Данилов В. М., Путков С. И., Селезнев А. Ф. Динамика корон рассеянных звездных скоплений	155
Дремова Г. Н., Дремов В. В., Тутуков А. В. Моделирование разрушений орбиты ТДС в поле СМЧД	156
Ермаш А. А., Комберг Б. В. Функция светимости активных галактик типа NLSy по данным обзора SDSS DR7	157
Зубарев С. Н., Мартюшев Л. М. Сравнение методов расчета для звезд эффективной температуры и болометрической поправки	158

Ионов Д. Э., Бисикало Д. В., Шематович В. И. Степень ионизации термосферы экзопланеты HD 209458b	159
Кирсанова М. С. Инфракрасное излучение и разрушение пыли в зонах HII	160
Кирсанова М. С., Соболев А. М., Вибе Д. З., Хенкель К., Цивилев А. П. Физические условия в областях звездообразования вблизи зоны HII S235	161
Любимов В. Н. Исследование X-фактора на ранних стадиях коллапса молекулярного облака	162
Пузин В. Б. Структура течения вещества в катаклизмических переменных звездах типа WZ Sge: наблюдения	163
Рудницкий Г. М. Исследование космических мазеров	164
Салий С. В., Соболев А. М., Nakashima J., Deguchi S. Исследование объекта IRAS 19312+1950 в линиях метанола	165
Скрипниченко П. В., Галушина Т. Ю. Оценка влияния различных возмущающих факторов на движение АСЗ	166
Судов Л. Н., Алексеева С. А. О приложениях решения уравнения Кеплера для близпараболического движения	167
Хайбрахманов С. А., Дудоров А. Е. Эффект Холла в аккреционных дисках молодых звезд	168
Шайдулин В. Ш. Уточнение скорости убывания общего члена ряда Лапласа для геопотенциала	169
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	171
Балуев Р. В. PlanetPack: средство анализа лучевых скоростей звезд для поиска и исследования экзопланетных систем	171
Захарова П. Е., Гламазда Д. В., Кузнецов Э. Д., Шагабутдинов А. И. Определение парусности высокоорбитальных объектов по позиционным наблюдениям на телескопе СБГ АО УрФУ	172
Кабанов А. А. Проблема образования СЕМР-звезд	173
Калинина Н. Д. CH_3CN в молекулярном ядре NGC 6334I	174
Кожевников В. П. Продолжительные фотометрические наблюдения звезды FBS 1220+753	175
Ладейщиков Д. А., Смирнов Г. Т., Цивилёв А. П. Разработка системы автоматизации для двухканального радиометра РТ-22 диапазона 8 мм	176
Левкина П. А., Бахтигараев Н. С., Чазов В. В. Результаты оптических наблюдений фрагментов космического мусора в 2012 г.	177
Лямова Г. В. О быстрых колебаниях солнечных пятен	178

Никифорова Т. П., Шагабутдинов А. И., Хусанова Я. И., Нанышев Д. Ш. Эмиссия линий H и K CaII в петель- ных системах двух взаимодействующих активных областей на Солнце	179
Соболев А. М., Горда С. Ю., Давыдова О. А. Открытие переменности блеска неправильного типа у вероятных мо- лодых звездных объектов в окрестности V645 Cyg	180
Суворова Д. С. «Бабочка» Маундера 24-го цикла солнечной активности	181
Фатеева А. М., Бисикало Д. В., Кайгородов П. В., Сы- тов А. Ю. Ударные волны в протопланетных дисках моло- дых двойных звезд	182

Фундаментальные вопросы исследования и клас- сификации тесных двойных систем в эпоху HIPPARCOS-GAIA. Сопутствующий научный семи- нар, посвященный 80-летию со дня рождения Мария Ана- тольевича Свечникова	183
Информация о семинаре	187
Марий Анатольевич Свечников	189

ОБЗОРНЫЕ ЛЕКЦИИ СЕМИНАРА	193
Антохина Э. А. Синтез кривых блеска и кривых лучевых ско- ростей тесных двойных систем. Определение масс звезд и релятивистских объектов	193
Дремова Г. Н. Классификация тесных двойных систем Свеч- никова	210
Малков О. Ю., Кайгородов П. В., Ковалева Д. А. База данных двойных звезд BDB: современные и будущие ка- талогии	225
Самусь Н. Н., Антипин С. В. Переменные звезды в эпоху астрономии больших объемов данных	237
Тутуков А. В., Федорова А. В. Поздние стадии эволюции компактных тесных двойных звезд	247

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ СЕМИНАРА	265
Антохин И. И. Рентгеновские свойства массивных двойных си- стем: теория и наблюдения	265
Бисикало Д. В., Кайгородов П. В., Устюгов В. А., Жил- кин А. Г., Montgomery M. M. Влияние ориентации маг- нитной оси белого карлика на эволюцию аккреционного дис- ка в промежуточных полярах	266
Горда С. Ю. 30 лет наблюдений затменно-переменных звезд	267

Еретнова О. В., Эбель М. А. Вероятность открытия тесных двойных звезд как затменных переменных	268
Кожевникова А. В. Пятенная активность тесных двойных си- стем	270
Кононов Д. А. Структура течения вещества в катаклизмичес- ких переменных звездах типа WZ Sge: моделирование	271
Орлов В. В., Жучков Р. Я. Статистика кратных звезд и сце- нарии их эволюции	273
Из истории науки	275
Левитская Т. И. Уральский период в жизни и творчестве А. А. Яковкина	277
Литературные страницы	283
Калинина Н. Д.	285
Соловьев А. А.	293
Хусанова Я. И.	297
Список участников	299

Научное издание

Физика Космоса

Труды 42-й Международной
студенческой научной конференции
Екатеринбург,
28 января — 1 февраля 2013 г.

Редактор Т. А. Федорова
Оригинал-макет — Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 14.01.13. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times.
Усл. печ. л. 18,2.
Тираж 160 экз. Заказ 19.

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.

Отпечатано в ИПЦ УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.
Тел. (343) 350-56-64.

ISBN 978-5-7996-0805-7

